

MEDITERRANEAN

Manuel de prévention de la pollution dans le **secteur du ciment**

CLEANER production



Centre d'activités régionales pour la production propre (CAR/PP)
Plan d'action pour la Méditerranée



Centre d'activités régionales
pour la production propre



 Generalitat de Catalunya
Gouvernement Catalan
**Ministère de l'Environnement
et du Logement**

Manuel de prévention de la pollution dans le **secteur du ciment**



Centre d'activités régionales pour la production propre (CAR/PP)
Plan d'action pour la Méditerranée



Centre d'activités régionales
pour la production propre



Generalitat de Catalunya
Gouvernement Catalan
**Ministère de l'Environnement
et du Logement**

Remarque : Cette publication peut-être reproduite intégralement ou partiellement, à des fins éducatives et non-lucratives, sans consentement spécifique du Centre d'activités régionales pour la production propre (CAR/PP), à la stricte condition que l'origine des informations soit mentionnée. Le CAR/PP souhaite recevoir un exemplaire de toute publication pour laquelle ce matériel aurait servi de source.

L'exploitation des ces informations n'est pas autorisée à des fins commerciales ou de vente sans le consentement écrit du CAR/PP.

Si vous considérez qu'un point de l'étude peut faire l'objet d'une amélioration ou si vous détectez des imprécisions, nous vous remercions de bien vouloir nous en faire part.

Étude publiée en mai 2008

Si vous souhaitez solliciter des copies de l'étude ou pour tout renseignement supplémentaire, contactez le :

Centre d'activités régionales pour la production propre (CAR/PP)

Dr Roux, 80
08017 Barcelona (España)
Tél. +34 93 553 87 90 – Fax. +34 93 553 87 95
Courriel : cleanpro@cprac.org
<http://www.cprac.org>

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	5
SYNTHESE	11
INTRODUCTION	13
1. PRODUCTION PROPRE / OBJECTIFS ET BENEFICES DE LA PREVENTION DE LA POLLUTION	17
2. SITUATION DES PAYS DU PLAN D'ACTION POUR LA MEDITERRANEE.....	21
2.1. PAYS DU SUD DE LA MÉDITERRANÉE.....	21
2.1.1. ALGÉRIE.....	24
2.1.2. ÉGYPTE.....	26
2.1.3. LIBAN.....	28
2.1.4. GRANDE JAMAHIRIYA ARABE LIBYENNE POPULAIRE ET SOCIALISTE	30
2.1.5. MAROC.....	32
2.1.5.1. <i>Introduction</i>	32
2.1.6. RÉPUBLIQUE ARABE DE SYRIE.....	34
2.1.7. TUNISIE.....	36
2.2. PAYS DU NORD DE LA MÉDITERRANÉE.....	38
2.2.1. ESPAGNE.....	39
2.2.2. FRANCE	41
2.2.2.1. <i>Industrie du secteur du ciment</i>	42
2.2.3. GRÈCE	43
2.2.4. ITALIE	46
2.2.5. MONACO.....	48
2.2.5.1. <i>Industrie et environnement</i>	48
2.3. PAYS DE L'EST DE LA MÉDITERRANÉE.....	49
2.3.1. ALBANIE	50
2.3.2. BOSNIE-ET-HERZÉGOVINE	52
2.3.3. CHYPRE	53
2.3.4. CROATIE	55
2.3.5. SLOVÉNIE	57
2.3.6. ISRAËL	59

2.3.7.	MALTE.....	61
2.3.8.	SERBIE et MONTÉNÉGRO.....	62
2.3.9.	TURQUIE.....	64
2.4.	SITUATION DE L'INDUSTRIE DU CIMENT DANS LES PAYS DU PAM.....	66
3.	DESCRIPTION DES PROCÉDES.....	77
3.1.	MATIÈRES PREMIÈRES.....	77
3.1.1.	Matières premières de base.....	77
3.1.1.1.	<i>Calcaire</i>	78
3.1.1.2.	<i>Marne</i>	78
3.1.1.3.	<i>Argile</i>	78
3.1.1.4.	<i>Ardoise</i>	79
3.1.1.5.	<i>Plâtre/anhydrite</i>	79
3.1.2.	Matières premières secondaires.....	79
3.1.2.1.	<i>Matériaux correcteurs</i>	79
3.1.2.2.	<i>Matériaux pouzzolaniques</i>	80
3.1.2.3.	<i>Recyclage et valorisation matérielle et énergétique de déchets</i>	81
3.2.	DESCRIPTION DES PROCÉDÉS DE PRODUCTION.....	84
3.2.1.	Obtention des matières premières.....	99
3.2.1.1.	<i>Exploitation des matières premières</i>	99
3.2.1.2.	<i>Transport des matières premières</i>	99
3.2.1.3.	<i>Concassage des matières premières</i>	99
3.2.2.	Stockage et préparation des matières premières.....	99
3.2.2.1.	<i>Stockage des matières premières</i>	99
3.2.2.2.	<i>Broyage du cru</i>	105
3.2.2.3.	<i>Homogénéisation du cru</i>	108
3.2.2.4.	<i>Exigences spéciales du procédé par voie semi-humide</i>	110
3.2.3.	Stockage et préparation des combustibles.....	112
3.2.3.1.	<i>Stockage de combustibles</i>	113
3.2.3.2.	<i>Préparation des combustibles</i>	113
3.2.3.3.	<i>Emploi de déchets comme combustibles alternatifs</i>	115
3.2.4.	Cuisson du clinker.....	117
3.2.4.1.	<i>Composition du clinker</i>	118
3.2.4.2.	<i>Procédé de cuisson du clinker</i>	120
3.2.4.3.	<i>Fours rotatifs</i>	122
3.2.4.4.	<i>Fours verticaux</i>	146
3.2.4.5.	<i>Refroidisseurs de clinker</i>	146
3.2.5.	Broyage et stockage du ciment.....	154
3.2.5.1.	<i>Stockage du clinker</i>	154
3.2.5.2.	<i>Broyeur à ciment</i>	156
3.2.5.3.	<i>Stockage du ciment</i>	161
3.2.6.	Produits de ciment.....	162
3.2.6.1.	<i>Propriétés et types de ciments</i>	162

3.2.7.	Ensachage et expédition.....	167
3.2.8.	Mise en œuvre du ciment	168
3.2.9.	Contrôle de qualité.....	170
4.	PROBLÉMATIQUES ENVIRONNEMENTALES DANS LA FABRICATION DU CIMENT : FLUX DE DÉCHETS ET CONSOMMATIONS	171
4.1.	SOURCES POTENTIELLES DE POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE.....	174
4.1.1.	Principales émissions dans l'atmosphère.....	174
4.1.1.1.	<i>Obtention de la matière première</i>	<i>176</i>
4.1.1.2.	<i>Préparation et stockage de la matière première.....</i>	<i>177</i>
4.1.1.3.	<i>Préparation et stockage du combustible</i>	<i>177</i>
4.1.1.4.	<i>Cuisson du clinker</i>	<i>177</i>
4.1.1.5.	<i>Broyage, ensachage et expédition du ciment.....</i>	<i>185</i>
4.1.2.	Gaz à effet de serre	185
4.1.2.1.	<i>L'effet de serre et le changement climatique.....</i>	<i>186</i>
4.1.2.2.	<i>Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques....</i>	<i>187</i>
4.1.2.3.	<i>Le protocole de Kyoto.....</i>	<i>187</i>
4.1.3.	Bruits et vibrations.....	190
4.1.4.	Odeurs	191
4.2.	SOURCES DE PRODUCTION DE DÉCHETS LIQUIDES ET LEUR CONTRÔLE	191
4.3.	SOURCES DE PRODUCTION DE DÉCHETS SOLIDES ET LEUR CONTRÔLE.....	191
4.4.	CONSOMMATION D'ÉNERGIE	192
4.4.1.	Principaux consommateurs énergétiques du processus de fabrication du ciment	192
4.4.1.1.	<i>Extraction de la matière première.....</i>	<i>192</i>
4.4.1.2.	<i>Préparation de la matière première</i>	<i>192</i>
4.4.1.3.	<i>Fabrication du clinker.....</i>	<i>193</i>
4.4.1.4.	<i>Broyage du ciment.....</i>	<i>193</i>
4.4.1.5.	<i>Expédition</i>	<i>194</i>
4.4.1.6.	<i>Tableau récapitulatif</i>	<i>194</i>
4.5.	CONSOMMATION D'EAU	195
4.6.	UTILISATION DE DÉCHETS INDUSTRIELS COMME MATIÈRES PREMIÈRES OU COMBUSTIBLES	196
4.6.1.	Avantages environnementaux	196
4.6.2.	Avantages socio-économiques.....	197
5.	OPPORTUNITÉS DE PRÉVENTION ET DE RÉDUCTION DE LA POLLUTION	199
	FICHE THÉORIQUE.....	200
5.1.	ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES À CARACTÈRE GÉNÉRAL.....	201
5.1.1.	OPTIMISATION DU CONTRÔLE DU PROCESSUS	201
5.1.2.	ADÉQUATION ET CONTRÔLE DES SUBSTANCES QUI ENTRENT DANS LE PROCESSUS.....	203

5.1.3.	RÉDUCTION DE LA CONSOMMATION DES RESSOURCES NATURELLES (MATIÈRES PREMIÈRES)	204
5.1.4.	RÉDUCTION DU RAPPORT CLINKER/CIMENT	205
5.2.	ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR UNE GESTION CORRECTE DE L'ÉNERGIE ...	206
5.2.1.	MESURES INTÉGRALES D'OPTIMISATION ÉNERGÉTIQUE DU PROCESSUS	207
5.2.2.	AMÉLIORATIONS DU PROCÉDÉ PAR VOIE SÈCHE	209
5.2.3.	PRÉCHAUFFEURS EN SUSPENSION.....	211
5.2.4.	REFROIDISSEUR À GRILLE ET VA-ET-VIENT MODERNE.....	212
5.2.5.	TECHNOLOGIES DE BROYAGE POUR LA PRÉPARATION DES MATIÈRES PREMIÈRES	213
5.2.6.	INSTALLATION DE BROYEUR À CYLINDRES POUR LA PRÉPARATION DU COMBUSTIBLE.....	214
5.2.7.	MESURES D'OPTIMISATION ÉNERGÉTIQUE DU BROYAGE FINAL DU CIMENT .	216
5.2.8.	RÉDUCTION DU FLUX DU BY-PASS D'ALCALIS	218
5.3.	ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR LE CONTRÔLE DES ÉMISSIONS DE NO _x	220
5.3.1.	BRÛLEUR À BAS NO _x	222
5.3.2.	REFROIDISSEMENT DE LA FLAMME	223
5.3.3.	COMBUSTION PAR ÉTAPES.	223
5.3.4.	RÉDUCTION NON CATALYTIQUE SÉLECTIVE (RNCS)	225
5.4.	ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR LE CONTRÔLE DES ÉMISSIONS DE SO ₂	226
5.4.1.	RÉDUCTION DE LA TENEUR EN SOUFRE DANS LES MATIÈRES PREMIÈRES ET LE COMBUSTIBLE.....	227
5.4.2.	AJOUT D'ABSORBEUR.....	229
5.4.3.	BARBOTEURS À GAZ SECS	230
5.4.4.	BARBOTEURS À GAZ HUMIDES	231
5.4.5.	ABSORPTION PAR CHARBON ACTIF	232
5.5.	ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR LE CONTRÔLE DES PARTICULES.....	233
5.5.1.	Contrôle des sources d'émission diffuses	233
5.5.2.	Contrôle des sources d'émission ponctuelles	234
5.5.3.	PRÉCIPITATEURS ÉLECTROSTATIQUES.....	235
5.5.4.	FILTRES À MANCHES	239
5.5.5.	FILTRES HYBRIDES	242
5.6.	ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR LE CONTRÔLE DES COV ET DES PCDD/PCDF	243
5.6.1.	SÉLECTION DES MATIÈRES PREMIÈRES ET DES COMBUSTIBLES	245
5.6.2.	AJOUT DE LA MATIÈRE PREMIÈRE DANS LA ZONE CHAUDE DU FOUR.....	245
5.6.3.	ABSORPTION PAR CHARBON ACTIF	246
5.7.	ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR LE CONTRÔLE DES ÉMISSIONS DE MÉTAUX.....	247

5.7.1.	SÉLECTION DES MATIÈRES PREMIÈRES OU DES COMBUSTIBLES	248
5.7.2.	ABSORPTION PAR CHARBON ACTIF.....	248
5.8.	ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR LA RÉDUCTION DU CO ₂	249
5.8.1.	REPLACEMENT DU COMBUSTIBLE PAR DES DÉCHETS.....	249
5.9.	ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR LA RÉDUCTION DES ODEURS.....	250
5.10.	ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR LE CONTRÔLE DES ÉMISSIONS DE BRUIT ..	251
5.10.1.	Bruit généré par les flux d'air	251
5.10.2.	Bruit généré par la machinerie.....	252
5.10.3.	Bruit en provenance des bâtiments	252
5.11.	ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR LE CONTRÔLE DES VIBRATIONS	252
5.11.1.	Vibration du broyeur à cylindres	253
5.11.2.	Vibrations des silos de clinker.....	253
5.12.	ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR LE CONTRÔLE DES DÉCHETS	253
5.13.	TECHNIQUES ÉMERGENTES.....	253
5.13.1.	TECHNOLOGIE DE FABRICATION DU CLINKER PAR LIT FLUIDISÉ.....	254
5.13.2.	COMBUSTION PAR ÉTAPES COMBINÉE AVEC LA RÉDUCTION NON CATALYTIQUE SÉLECTIVE (RNCS).....	256
5.13.3.	RÉDUCTION CATALYTIQUE SÉLECTIVE (RCS).....	256
6.	CAS PRATIQUES	259
6.1.1.	INSTALLATION D'UN BROYEUR À CYLINDRES HORIZONTAL	259
6.1.2.	CIRCUIT FERMÉ DE L'EAU DE REFROIDISSEMENT	261
6.1.3.	INSTALLATION D'UN FILTRE HYBRIDE	261
6.1.4.	INSTALLATION DE CYCLONES.....	263
6.1.5.	INSTALLATION DE FILTRES À MANCHES	263
6.1.6.	IMPLÉMENTATION D'UN SYSTÈME DE CONTRÔLE DU PROCESSUS	265
6.1.7.	IMPLÉMENTATION D'UN PROGRAMME DE MAINTENANCE	265
7.	GLOSSAIRE.....	267
8.	BIBLIOGRAPHIE	271

SYNTHESE

Le défi actuel de l'industrie cimentière consiste à adopter les mesures nécessaires pour permettre un développement durable et garantir sa compétitivité. Même si elle a déjà misé sur l'environnement, l'industrie cimentière doit encore réaliser un effort plus important pour minimiser la consommation de ressources naturelles et l'impact sur l'environnement.

Le but de ce manuel de prévention de la pollution dans le secteur du ciment est d'offrir des outils et des critères de décision en vue de parvenir à une amélioration progressive de l'environnement dans les entreprises des pays du plan d'action pour la Méditerranée et d'atteindre ainsi une production plus propre.

L'objectif de la production plus propre est l'application continue d'une stratégie environnementale préventive intégrée dans les processus, les produits et les services afin d'augmenter l'efficacité et de réduire les risques pour les personnes et l'environnement. Cette stratégie passe par l'évaluation et l'adoption progressive des meilleurs techniques disponibles pour minimiser la pollution, qui soient techniquement et économiquement viables en tenant compte des caractéristiques spécifiques à chaque processus de production.

Ce manuel révèle que l'adoption d'alternatives pour la prévention de la pollution permet de réduire la consommation de ressources naturelles (matières premières, énergie, eau, etc.), de diminuer les courants résiduels et d'augmenter l'efficacité du processus de production, ce qui permet de réduire les coûts du processus tout en améliorant la compétitivité des installations industrielles.

Étant donné que l'objectif principal de la production plus propre est de minimiser les émissions à leur source, l'ordre des actions est le suivant : prévenir, réduire et réutiliser. On envisagera toutefois, de façon complémentaire, le traitement des émissions finales afin de minimiser leur impact sur l'environnement.

Comme le montre le chapitre 2, la portée de ces actions dépend de la législation en vigueur dans chaque pays, qui présente de grandes différences, à l'exception des pays de l'Union européenne qui doivent respecter la directive relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution (IPPC). Les matières premières utilisées et les principaux processus de production sont décrits dans le chapitre 3. Ensuite, les principales sources potentielles de pollution ainsi que les consommations d'énergie les plus courantes pour chaque type de processus sont indiquées dans le chapitre 4.

Les principaux aspects environnementaux associés à la production de ciment sont la consommation d'énergie et les émissions atmosphériques de particules, NO_x, SO₂ et CO₂. Les particules sont dues à des sources diffuses et à des foyers ponctuels ; les gaz proviennent du foyer principal, c'est-à-dire du four à clinker.

Les rejets d'eaux résiduelles se limitent aux eaux pluviales, au refroidissement des équipements (normalement en circuit fermé) et à l'eau sanitaire. Ils n'ont pas d'impact environnemental significatif. En revanche, le stockage et la manipulation de combustibles sont des sources potentielles de pollution du sol et des eaux souterraines.

L'industrie cimentière se caractérise par sa consommation intensive en énergie, c'est pourquoi les usines de production appliquent de plus en plus des mesures d'amélioration du rendement énergétique, ce qui entraîne une réduction des émissions associées au combustible.

Le chapitre 5 de ce manuel présente les différentes alternatives permettant de prévenir la pollution à la source en indiquant dans chaque cas les améliorations qui pourraient être obtenues. De même, il décrit les traitements finals qui peuvent être mis en œuvre pour minimiser l'impact environnemental des émissions finales.

Enfin, le chapitre 6 présente une série d'études de cas visant à faciliter la prise de décision concernant certains traitements concrets. Plusieurs types de cas ont été choisis, allant de cas très concrets, pour lesquels sont indiqués les avantages obtenus dans une usine par l'implantation d'une des alternatives proposées, à des cas plus généraux montrant les alternatives les plus utilisées dans un groupe d'usines ou décrivant les différentes étapes mises en œuvre pour atteindre une production plus propre.

On trouvera dans la bibliographie de ce manuel une série de publications, d'institutions et de pages Web susceptibles de fournir des informations supplémentaires au lecteur.

INTRODUCTION

La production de ciment et ses applications présentent un lien très étroit avec l'activité de la construction, puisque ses produits sont destinés à différentes étapes de la construction, que ce soit dans l'industrie du bâtiment ou dans les travaux publics. En raison de cette relation avec l'activité de la construction, ce secteur est un secteur stratégique pour l'industrie.

L'importance du ciment repose sur sa propriété à former des masses dures résistantes et durables lorsqu'il est mélangé à des agrégats et à de l'eau. La prise et le durcissement du mélange se produisent un certain temps après la réalisation du mélange, ce qui permet de donner une forme à (mouler) la pierre artificielle obtenue. Le ciment, outre sa grande disponibilité, s'adapte aux différentes exigences et présente un faible coût par rapport aux autres matériaux.

Le ciment a joué un rôle clé dans l'histoire de la civilisation et son utilisation est constatée depuis l'antiquité. Les progrès économiques et industriels, les sources de matières premières et les conditions climatiques ont entraîné des progrès aussi bien sur les matériaux que sur les systèmes de construction. Ainsi, de nombreux types de ciment sont actuellement fabriqués en fonction des exigences du marché.

Les produits dérivés du ciment sont généralement des produits ayant une longue durée de vie et, lorsqu'ils ne sont plus utiles, il est difficile de séparer à nouveau leurs composants originaux, ce qui rend difficile leur réutilisation voire leur recyclage. Ces produits sont composés dans leur majorité de matériaux inertes : lorsqu'ils sont éliminés, ils ne contaminent donc pas le sol ni les eaux mais ils occupent beaucoup de place. La tendance actuelle dans les pays développés est de fermer le cycle de vie du ciment et de ses dérivés en réutilisant et en recyclant les déchets de construction et de démolition.

De même que dans d'autres secteurs industriels, l'industrie cimentière cherche à atteindre un développement durable. Le développement durable demande une vision à long terme dans laquelle les entreprises ont pour objectif de préserver la qualité de la vie, ce qui signifie le respect des besoins des hommes et des écosystèmes, aussi bien locaux que mondiaux. Dans ce processus dynamique, on tient compte non seulement des aspects environnementaux, mais aussi des aspects socio-économiques comme par exemple le bien-être social et l'emploi. Certaines mesures peuvent être implantées à court terme mais d'autres nécessitent de longues périodes de planification et d'adaptation. De nombreuses entreprises ont déjà adopté des mesures effectives sur un large éventail de sujets environnementaux et sociaux, ce qui leur a même ouvert de nouvelles opportunités de marché. Cependant, l'application des nouvelles technologies compatibles avec un développement durable demande un investissement important de la part des entreprises. Ce développement dépend essentiellement de la localisation des centres de production, des attentes de leurs actionnaires ou de leurs propriétaires et de l'identification de nouvelles opportunités de marché.

Il ne faut pas non plus oublier que les usines, à l'heure actuelle, sont confrontées non seulement au processus de développement durable, avec tous les changements que cela suppose, mais aussi au processus de mondialisation. En définitive, le développement durable de l'industrie du ciment présente des opportunités et des défis qui demandent une adaptation des fabricants à tous ces changements afin de trouver comment maintenir la rentabilité des usines tout en réduisant leur impact environnemental.

La prise de conscience environnementale croissante et sa répercussion sur les normes environnementales des pays a mis en évidence le fait que tous les secteurs de production, y compris celui du ciment, doivent concentrer leurs efforts pour contrôler, réduire et prévenir la pollution à la source en minimisant les émissions atmosphériques et en optimisant leurs besoins énergétiques.

- Les coûts énergétiques se situent aux alentours de 30 % des coûts de production du ciment et les entreprises cimentières ont optimisé leurs procédés et leurs équipements afin d'améliorer progressivement le rendement énergétique de leurs usines de fabrication, en particulier depuis les années 70. En outre, plus récemment, l'industrie du ciment (qui participe globalement aux émissions de CO₂ à hauteur de 5 % environ) est concernée dans certains pays du plan d'action pour la Méditerranée par la nouvelle législation dérivée du protocole de Kyoto. Ainsi, de nombreuses usines doivent utiliser des droits d'émission des gaz à effet de serre ou doivent mettre en place des objectifs de mécanismes de développement propre. Ainsi, l'optimisation énergétique et l'utilisation de matières premières renouvelables deviennent encore plus importantes.

Actuellement, l'industrie cimentière apporte dans le domaine de la valorisation énergétique une solution écologique et sûre à la gestion de certains types de déchets organiques en les utilisant comme combustibles alternatifs : farines animales, huiles usées, dissolvants, etc. En même temps, l'industrie cimentière apporte un potentiel important de contributions environnementales dans la gestion de déchets d'autres activités industrielles, puisqu'ils peuvent être utilisés comme matière première dans la préparation du cru (cendres, boues de l'industrie papetière, sables de fonderie, etc.) et/ou comme adjuvants dans le broyage du ciment (scories de haut-fourneau, fumée de silice, etc.).

De cette façon, une stratégie a été progressivement mise en place afin d'optimiser les activités du secteur du ciment, aussi bien du point de vue environnemental que de celui de la rentabilité et de la compétitivité. Les lignes essentielles de cette stratégie peuvent être résumées de la façon suivante :

- Amélioration du comportement environnemental des installations de fabrication grâce à une meilleure gestion environnementale, à la modernisation des équipements et à des moyens de protection de l'environnement ;
- Réduction de la consommation énergétique nécessaire pour la fabrication du ciment et réduction des coûts, grâce à :
 - Une amélioration du rendement énergétique des équipements et des procédés de production ;
 - Recherche et promotion des ciments avec adjuvant qui nécessitent pour leur fabrication une plus petite quantité de clinker et, par conséquent, moins de combustible ;
- Utilisation de déchets et de sous-produits comme matières premières et combustibles alternatifs, afin de contribuer au respect de l'environnement par le recyclage et la valorisation matérielle et énergétique des déchets, en plus d'une économie de ressources non renouvelables ;
- Adaptation au nouveau cadre de libéralisation énergétique vers lequel se tourne la plupart des pays du plan d'action pour la Méditerranée ;
- Confrontation des entreprises à la concurrence internationale et nécessité de s'adapter aux normes de qualité et aux autres standards internationaux tels que les normes des séries ISO-9000 et ISO-14000 ou l'EMAS.

On reconnaît ainsi que la solution la plus efficace aux problèmes de pollution est de minimiser la génération de flux de déchets grâce à l'application de technologies propres qui corrigent le problème à la source. Cette solution peut être adoptée aussi bien par les industries nouvelles que par celles qui veulent moderniser leurs installations de production.

Le but de ce manuel est d'offrir des outils et des critères de décision en vue d'implanter une amélioration environnementale progressive dans les entreprises, en fournissant aux pays du plan d'action pour la Méditerranée des informations pour la prévention de la pollution dans le secteur du ciment.

Selon une étude publiée en janvier 2004 par le Centre d'activités régionales pour la production propre (CAR/PP) sur « l'état de la production plus propre dans les pays du plan d'action pour la Méditerranée » et conformément aux manifestations des points focaux nationaux du CAR/PP concernant le concept de production plus propre, la majorité des pays méditerranéens ont adopté la

définition du PNUE (Programme des Nations unies pour l'environnement), selon laquelle : « La production plus propre est la mise en œuvre continue d'une stratégie préventive intégrée à tous les processus, produits et services, afin d'améliorer leur efficacité et de réduire les risques pour les humains et environnementaux ». Toutefois, dans certains cas, la production plus propre est assimilée à des concepts tels que les meilleures techniques disponibles (MTD) et les technologies plus propres.

Dans ce manuel, nous traiterons en premier lieu les problématiques environnementales potentielles des usines du secteur du ciment, qui sont :

- La consommation d'énergie ;
- Les émissions atmosphériques ;
- La génération de déchets.

Ensuite, nous étudierons les processus de fabrication de ce secteur dans les pays du plan d'action pour la Méditerranée, en décrivant de façon détaillée les problématiques environnementales exposées précédemment. Finalement, nous proposerons des alternatives de prévention de la pollution à la source, en indiquant à titre d'exemple des cas précis d'application de certaines solutions alternatives proposées.

Le document est structuré de la façon suivante :

PARTIE I : Production propre / objectifs et bénéfices de la prévention de la pollution

Ce point définit le concept de « prévention de la pollution » et offre un résumé des bénéfices de l'application de ces techniques de prévention.

PARTIE II : Prévention de la pollution dans le secteur du ciment

Cette partie décrit la situation actuelle du secteur du ciment dans la région méditerranéenne ainsi que les processus associés à ce secteur et les principaux impacts sur l'environnement ; elle fournit également des solutions alternatives pour la prévention de la pollution.

PARTIE III : Cas pratiques

Cette section présente des exemples spécifiques d'entreprises qui ont utilisé différentes solutions alternatives pour la prévention de la pollution. Ces études de cas décrivent la stratégie suivie ainsi que les bénéfices, notamment les économies sur les coûts que les entreprises en ont retirées.

1. PRODUCTION PROPRE / OBJECTIFS ET BENEFICES DE LA PREVENTION DE LA POLLUTION

La production plus propre dans un environnement industriel vise à une exécution efficace des processus de production de façon à générer un minimum de sous-produits ou de flux de déchets non recyclables en interne, avec une consommation minimale de matières premières et de ressources.

La production plus propre repose sur trois domaines d'action :

- Prévenir ;
- Réduire ;
- Réutiliser au niveau interne.

La *prévention* est orientée vers la prise de décisions en phase de conception d'une nouvelle usine ou de remaniement d'usines existantes, afin de prévenir la pollution, c'est-à-dire de ne pas générer de flux de déchets. De cette façon, le choix portera sur des solutions alternatives minimisant la génération de flux de déchets, ce qui permettra de réduire l'impact sur l'environnement.

La *réduction*, encore appelée minimisation, est appliquée aux processus qui disposent encore d'une marge d'amélioration bien qu'ils soient déjà totalement mis en œuvre. Les modifications devront considérer la réduction des flux de déchets générés et/ou la consommation de matières premières et de ressources naturelles.

La *valorisation* interne considère l'utilisation des flux de déchets comme matière première à l'intérieur de l'entreprise, dernière ressource pour limiter l'impact sur l'environnement.

Plus on mettra l'accent sur le concept de production plus propre, plus l'effet des mesures sur l'environnement sera important.

Du point de vue des coûts, on doit envisager la production plus propre comme un procédé qui génère des bénéfices au cours du temps. La production plus propre réduit ainsi les coûts en améliorant le rendement de la production.

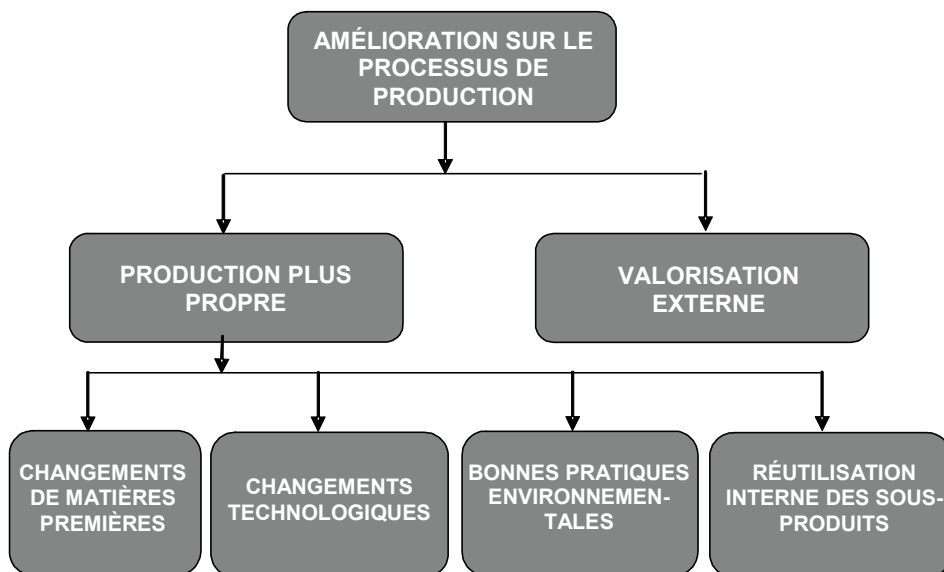
Ainsi, la planification et la conception d'un processus qui choisira des techniques permettant de minimiser la génération de flux de déchets sera à moyen et à long terme beaucoup plus rentable, sur un plan environnemental et économique, que les processus comprenant seulement une bonne gestion du traitement des flux de déchets en bout de chaîne.

Parmi les principales causes qui favorisent une présence de plus en plus importante de la production plus propre dans le secteur du ciment, on trouve :

- Un cadre légal de plus en plus strict et de plus en plus contrôlé ;
- Une consommation élevée d'énergie ;
- L'incorporation des coûts environnementaux dans la gestion financière du produit ;
- Une sensibilisation environnementale de plus en plus importante chez les fabricants, les consommateurs et les clients ;
- Une amélioration technique en appliquant des procédés de production plus propres qui offrent des produits de même qualité ou de qualité supérieure.

Les mesures de production plus propre peuvent être regroupées selon les axes suivants :

- Changement de matières premières et de combustibles : mesures d'amélioration consistant à remplacer ou à modifier les matières premières et les combustibles consommés par les processus afin d'en utiliser d'autres dont le potentiel de pollution est inférieur ;
- Modifications technologiques : modifications apportées aux processus ;
- Mesures sur l'organisation : mesures visant à obtenir une bonne utilisation des équipements et des systèmes afin d'optimiser le fonctionnement de l'usine ;
- Recyclage interne des sous-produits ou des flux de déchets : réutilisation dans le processus lui-même, avec ou sans traitement préalable (selon les cas) des flux de déchets générés, en les considérant comme une nouvelle matière première.



Comme le définit l'EPA (Agence pour la protection de l'environnement des États-Unis), la prévention de la pollution représente « ... la plus grande réduction possible de tous les déchets générés sur leurs lieux de production. Les ressources doivent alors être utilisées correctement grâce à une réduction à la source, une efficacité d'utilisation de l'énergie, une récupération des matériaux utilisés comme ressources pour la production et une diminution de la consommation d'eau. Il existe généralement deux méthodes de réduction à la source qui peuvent être utilisées dans un programme de prévention de la pollution : le changement des produits et le changement des processus. Ces changements réduisent le volume et la toxicité des déchets de production et des produits finals pendant leur cycle de vie et lors de leur rejet. »

OBJECTIFS DE LA PRÉVENTION DE LA POLLUTION

L'objectif du programme pour la prévention de la pollution à la source est d'améliorer la qualité de l'environnement grâce à l'élimination et/ou la diminution de la génération de flux de déchets. La prévention de la pollution comprend toute action mise en œuvre par une entreprise pour réduire la quantité de déchets générés par ses processus de fabrication avant le recyclage, le traitement ou le rejet de ces déchets hors du site.

BÉNÉFICES D'UN PROGRAMME POUR LA PRÉVENTION DE LA POLLUTION

Les entreprises qui disposent d'un plan réel et continu pour prévenir la pollution ont un avantage significatif en termes de concurrence dans leur industrie, étant donné qu'elles diminuent leurs coûts de fonctionnement et de production. Ainsi, un programme de prévention de la pollution peut apporter les bénéfices suivants :

- **Protection de la santé humaine et la qualité de l'environnement** : la réduction des polluants émis dans l'air, la terre et l'eau, l'aidera à protéger l'environnement et la santé humaine ;
- **Réduction des coûts de fonctionnement** : à long terme, un vrai programme de réduction de la pollution peut entraîner des économies permettant d'amortir les coûts de développement et d'implantation des programmes ;
- **Motivation des employés** : les employés se sentiront mieux dans leur entreprise s'ils croient que la direction s'engage à leur fournir un environnement de travail plus sûr et si, de plus, elle contribue à la vie de la société en tant que membre responsable ;
- **Amélioration de l'image de l'entreprise** : en montrant une conscience environnementale, l'image de l'entreprise est améliorée, des opinions plus positives se créent envers les entreprises qui possèdent une culture du respect de la nature. Ceci peut ouvrir de nouvelles opportunités de marché pour certains produits ;
- **Amélioration concernant le respect de la législation environnementale** : en suivant un plan de prévention de la pollution, l'entreprise augmente ses chances d'éviter des infractions et des amendes relatives à la législation environnementale.

2. SITUATION DES PAYS DU PLAN D'ACTION POUR LA MEDITERRANEE

L'objectif de ce chapitre est de fournir au lecteur une image générale de la situation actuelle des différents pays du plan d'action pour la Méditerranée. Pour cela, il fournit des informations socio-économiques sur le pays, des aspects concrets de l'industrie du pays et les principaux impacts sur l'environnement liés à l'activité industrielle (en particulier au secteur de la fabrication de ciment). Il indique également les lois et les normes existantes dans le cadre légal actuel pour prévenir et contrôler la pollution, les agents impliqués dans la promotion de la production plus propre, les programmes et les plans d'action créés pour promouvoir la production plus propre ainsi que les activités et les outils utilisés pour promouvoir et diffuser la production plus propre.

Les informations ont été obtenues à partir de sources bibliographiques d'organismes officiels tels que les instituts de statistiques, les agences pour l'environnement, les bureaux de l'énergie, les ministères de l'économie, etc., ainsi qu'à partir de la deuxième édition de l'étude récemment publiée par le centre d'activités régionales pour la production propre (CAR/PP) : « État de la production plus propre dans les pays du plan d'action pour la Méditerranée ». Cette nouvelle édition est une mise à jour et un complément de l'étude que le centre a publiée en 2001. Elle analyse les principaux progrès enregistrés dans les pays méditerranéens concernant l'adoption de normes, de programmes et de plans d'action pour la prévention de la pollution et le développement de la production plus propre.

Nous étudierons ici les différents pays de la région, regroupés en trois sous-régions (Sud, Nord et Est). Ces informations ne sont ni révisées ni approuvées par les points focaux nationaux de chaque pays, pour des questions pratiques.

2.1. PAYS DU SUD DE LA MÉDITERRANÉE

Ce groupe comprend l'Algérie, l'Égypte, le Liban, la Libye, le Maroc, la Syrie et la Tunisie, tous membres de la Ligue des États arabes et possédant des caractéristiques spécifiques communes malgré les différences politiques qui peuvent exister. Tous ces pays partagent certains principes culturels et des langues similaires, ce qui facilite l'action commune.

La modernisation de l'industrie existante, le développement du droit environnemental et du système législatif, l'adoption de plans d'action environnementale au niveau national et la mise en place de centres nationaux pour la production plus propre, en soutien de la stratégie adoptée par chaque pays, comptent parmi les caractéristiques principales de cette région.

Industrie et environnement

Au cours des trente dernières années, les pays du sud de la Méditerranée ont présenté des améliorations en ce qui concerne les questions de santé, d'éducation et de qualité de la vie. Cependant, ce développement a été influencé négativement par une augmentation de la pression de la population, par la récession économique et par les conflits armés.

La croissance rapide de la population des pays du sud de la Méditerranée ainsi que l'augmentation des activités humaines, en particulier dans les zones urbaines, font augmenter la pression sur l'environnement ainsi que la production de déchets et la pollution.

Le produit intérieur brut (PIB) des pays du sud de la Méditerranée a augmenté considérablement au cours de la dernière décennie. La plupart des pays ont mis en place des réformes et des restructurations économiques, ont encouragé l'économie de marché ainsi que la décentralisation et ont obtenu une réduction des indices d'inflation.

Le poids de l'industrie dans ces pays est considérable ; il représente plus de 25,5 % du PIB total de la région (extraction de brut exclue). L'industrialisation représente une source importante de revenus pour les États grâce au commerce de ces produits, à la création d'emploi et de valeur ajoutée aux produits primaires.

La structure industrielle des pays du sud de la Méditerranée présente quelques points communs :

- Le développement industriel des pays du sud de la Méditerranée se base principalement sur l'exploitation de sources d'énergie naturelles non renouvelables. Le pétrole et le gaz qui sont extraits en Libye, en Algérie et en Égypte ont acquis une grande importance, aussi bien pour l'exportation que pour les industries à grande consommation énergétique et à valeur ajoutée qui ont proliféré dans la zone ;
- En plus du pétrole et du gaz, les pays du sud de la Méditerranée ont tendance à se concentrer sur d'autres activités d'extraction ou de traitement des matières premières, comme par exemple les phosphates et autres minerais au Maroc, ou l'industrie agricole en Syrie ;
- La présence d'industries productrices de biens d'équipement est relativement rare malgré l'importance que ce secteur pourrait représenter s'il était favorisé dans des pays comme l'Égypte, Maroc et la Tunisie ;
- Enfin, les exportations des produits fabriqués sont toujours très limitées et le déficit de la balance commerciale très élevé. Ainsi, la situation pourrait changer si de nouvelles politiques visant à favoriser les exportations étaient mises en place.

Malgré les récentes tentatives de diversifier le tissu industriel, en assignant des ressources importantes du budget national à l'industrie et aux infrastructures qui en ont besoin, le comportement du secteur de la fabrication dans les pays du sud de la Méditerranée n'a pas été satisfaisant. Cela s'explique par la tendance dominante qui consiste à importer les biens d'équipement, au manque de stratégies de développement industriel adaptées, à la protection artificielle de l'industrie nationale et au manque de coopération en matière commerciale et industrielle entre les différents pays qui composent cette région.

L'industrie minière et le traitement des minerais et métaux industriels ont progressé, tout comme l'extraction de combustibles fossiles.

Les pays tels que l'Égypte, la Syrie, la Tunisie et le Maroc, qui possèdent des économies diversifiées, continuent de se concentrer sur les industries traditionnelles telles que la production d'aliments, de ciment et de textile.

Peu de pays ont pu développer des industries compétitives grâce à l'introduction de technologies modernes. De plus, dans beaucoup de ces pays, l'industrialisation poursuit son développement en suivant des politiques incompatibles avec le concept de développement durable.

Le modèle de développement industriel qui a été appliqué dans les pays du sud de la Méditerranée a contribué à l'apparition de « points noirs de pollution » qui ont causé une détérioration environnementale importante et la surcharge des infrastructures publiques de protection de l'environnement dans les grandes villes.

Dans les pays possédant un niveau d'industrialisation relativement plus important (par exemple l'Égypte, le Maroc, la Tunisie ou la Syrie), les problèmes environnementaux sont encore plus sérieux en raison :

- Des traitements inadaptés en bout de chaîne, d'une manipulation et d'une élimination incorrecte des déchets dangereux ;

- De la difficulté de contrôle des déchets et des émissions industrielles en raison du manque d'instruments et de personnels qualifiés ;
- Du manque de volonté de la part de la majorité des entreprises polluantes à investir dans des mesures visant à diminuer la pollution ;
- Du manque de personnel spécialisé et formé pour gérer le fonctionnement des installations de traitement des déchets.

Cependant, l'industrie reconnaît actuellement le besoin d'éviter ou de réduire la génération de déchets en ayant recours aux nouvelles technologies de prévention de la pollution. Cette tendance a permis d'améliorer progressivement les comportements de production et de consommation.

Cadre politique et légal

La législation environnementale de tous les pays du sud de la Méditerranée a été largement revue et modifiée au cours des dernières années. En général, les pays de cette région adoptent une loi environnementale générale (cadre), complétée par des normes sectorielles. Tous ces pays se sont dotés des lois de contrôle de la pollution industrielle des eaux qui protègent directement ou indirectement l'environnement marin et la plupart d'entre eux ont également adopté les normes sur l'évaluation de l'impact sur l'environnement (EIE) dans les systèmes de délivrance de permis.

Dans la plupart des pays, la modernisation du cadre légal a favorisé la régulation des facteurs en lien avec la PP, principalement à l'aide de lois sur les déchets et en introduisant de nouvelles conditions environnementales dans le processus d'obtention de permis.

C'est le cas par exemple de la loi sur les déchets de l'Algérie ou des conditions de réduction des déchets introduites dans la législation égyptienne ; la PP figure également dans le projet de loi sur les déchets au Maroc. La révision du cadre légal a permis à la Tunisie d'inclure des conditions plus concrètes pour l'économie d'énergie et d'eau. L'Algérie a inclus, elle aussi, des mesures de prévention et de réduction de la pollution à la source et, comme seconde option, la valorisation des déchets générés.

Cependant, il faudra probablement attendre un certain temps pour atteindre l'application complète des lois puisque, pour cela, il faut une structure administrative adaptée. Le secteur industriel sera mieux disposé à se soumettre à une application effective de la norme si les mesures pour le contrôle de son respect sont accompagnées d'autres mesures incitatives telles que, par exemple, des accords volontaires ou des primes. De plus, il existe peu de motivation pour adopter la PP, à part celle d'éviter les amendes.

Le Liban finance des audits et a augmenté la quantité de crédits aidés qu'il concède pour accélérer l'adoption de nouvelles technologies environnementales et, entre autres, la modernisation environnementale.

D'autres motivations existent également en Syrie pour les industries plus propres et pour ceux qui investissent dans la modernisation environnementale et dans l'adaptation à des technologies plus propres.

Des accords et des instruments volontaires pour augmenter la prise de conscience du secteur industriel et augmenter sa responsabilité environnementale ont été mis en place dans certains pays. Dans ce sens, le Maroc a implanté le programme de « Responsible Care », qui a été adopté par certaines industries. En Algérie, des systèmes de gestion environnementale et des audits environnementaux sont développés et diffusés.

Dans le cadre international pour la protection de l'environnement à travers la prévention de la pollution, tous les pays du sud de la Méditerranée sont membres de la Convention de Bâle sur les déchets dangereux et une grande partie a signé la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants. En ce qui concerne la réduction de la couche d'ozone, tous ces pays ont signé ou ratifié également le protocole de Montréal et ses modifications, à l'exception de celle de

Pékin de 1999. Pour ce qui est du changement climatique, l'Algérie, Égypte, Maroc et la Tunisie ont ratifié le protocole de Kyoto.

Dans le cadre du plan d'action pour la Méditerranée, et en ce qui concerne les protocoles relatifs aux activités situées à terre, tous les pays du sud de la Méditerranée ont ratifié le protocole pour la protection de la mer Méditerranée contre la pollution causée par des sources et des activités terrestres, même si seulement certains d'entre eux ont accepté les modifications de 1995, qui comprennent, entre autres, les principes de précaution et du « pollueur payeur », les meilleures techniques disponibles (MTD), les meilleures pratiques environnementales (MPE) et les technologies plus propres, qui sont à prendre en compte au moment d'élaborer les plans nationaux de lutte contre la pollution.

2.1.1. ALGÉRIE

Introduction

L'Algérie est un pays arabe situé au nord de l'Afrique au bord de la mer Méditerranée. Sa superficie totale est de 2 381 740 km² et sa population est d'environ 31,3 millions d'habitants.

L'économie de ce pays repose en grande partie sur le secteur des hydrocarbures. L'Algérie possède la cinquième réserve de gaz naturel du monde, c'est le deuxième pays exportateur de gaz et il occupe la quatorzième place en termes de réserves de brut.

Au cours des dernières années, l'économie algérienne a enregistré une croissance annuelle approximative de 4 %. Néanmoins, ce pays n'a pu réduire que faiblement son taux de chômage et n'a pas pu améliorer le niveau de vie de la population de façon substantielle. Le gouvernement a l'intention de poursuivre ses efforts pour diversifier l'économie et attirer des investissements nationaux et étrangers dans d'autres secteurs que celui de l'énergie.

Tableau 2.1.1. Indicateurs de la situation socio-économique en Algérie.

Superficie	10 ⁶ km ²	2,4
Population	millions	31,3
Espérance de vie	ans	73
Énergie par habitant	équiv. kg de pétrole	956
PIB actuel	10 ⁹ \$	212,3
Croissance du PIB	%	6,1
PPA du PIB par habitant	\$	6 600

Source : Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)
(PPA = parité de pouvoir d'achat)

Industrie et environnement

L'Algérie a connu une croissance économique significative pendant les 40 dernières années, qui a été marquée par un développement important de l'industrie. En conséquence, un grand nombre d'industries s'est établi dans le nord du pays, près des grandes zones urbaines et le développement durable n'a pratiquement pas été pris en compte.

Les technologies ont été choisies exclusivement en fonction du critère de productivité et très souvent aux dépens de la pollution. L'Algérie doit donc faire face aujourd'hui à un grave problème de pollution. L'industrie, et plus concrètement le secteur des mines et des industries pétrochimiques, chimiques et métallurgiques, est le principal responsable de la pollution du pays.

L'industrie est concentrée dans les zones littorales (moins de 2 % de la surface totale du pays), où il existe également une plus grande densité de population (autour des grandes zones urbaines industrialisées et des villes, principalement à Alger, Oran, Constantine, Annaba et Skikda).

Le secteur industriel privé est composé dans sa grande majorité de petites et moyennes entreprises (PME), dont le nombre oscille entre 25 000 et 35 000. 93 % d'entre elles sont des micro-entreprises avec moins de 10 travailleurs. Ces PME se retrouvent dans toutes les branches d'activité, surtout dans les secteurs du textile et de la confection, du tannage et de la cordonnerie, des matériaux de construction, de l'agroalimentaire ainsi que dans les industries de transformation, et elle génère une grande quantité de déchets et d'eaux résiduaires.

Les principaux impacts de l'industrie sur l'environnement en Algérie sont :

- La dégradation de la qualité de l'air (émissions de polluants atmosphériques, tels que les gaz de combustion, les fumées et la poussière, les vapeurs de métaux lourds, etc.) ;
- La pollution des ressources hydriques (rivières, nappes phréatiques, barrages, eaux du littoral, etc.) ;
- La génération de déchets industriels ;
- Les principales zones d'activités industrielles du pays s'étendent le long du littoral.

Industrie du secteur du ciment

Le secteur du ciment, comme beaucoup d'autres de l'économie algérienne, est de plus en plus privatisé. Ce pays réalise des efforts pour attirer des investisseurs potentiels, ce qui améliorera les opportunités dans le secteur.

La consommation de ciment en Algérie a augmenté de 6,1 % en moyenne entre 1997 et 2003, suite à un important développement du secteur de la construction du pays. La construction de nouveaux logements et d'un plus grand nombre d'infrastructures contribue à une augmentation de la demande nationale en ciment et on attend une augmentation moyenne annuelle d'au moins 6,5 % jusqu'en 2009.

En ce qui concerne la production de ciment, la production locale a atteint 8,95 Mt en 2002 et elle a augmenté jusqu'à 9 Mt en 2003. L'ouverture d'une nouvelle usine de 2,1 Mt de capacité en 2004 par la compagnie algérienne du ciment (ACC) a entraîné une augmentation importante de la production nationale.

Au cours des dernières années, de nouvelles usines ont été construites. Actuellement, l'Algérie possède 15 usines intégrées et présente une capacité de production totale de ciment de 14,5 Mt.

Les exportations de ciment sont nulles. Au contraire, les importations jouent un rôle important dans le secteur et l'Égypte est le plus grand fournisseur de ciment et de clinker d'Algérie, suivie par la Turquie. Le maximum des importations a été atteint en 2003 avec 2,5 Mt, pour redescendre à 2 Mt en 2004. On s'attend à la poursuite de la diminution des importations à partir de 2005 même si elles devraient continuer à avoir une influence importante dans le secteur.

Tableau 2.1.2. Données principales de l'industrie du ciment en Algérie. Année 2004.

Production (kt/an)	10 500
Consommation de ciment (kt/an)	12 000
Nombre d'usines intégrées	15
Effectifs approximatifs	6 029
Capacité de production des fours à clinker kt/an (*)	12 500
Capacité de production en ciment kt/an	14 500

Source : *Global Cement Report 2005*

(*) Année 2002. *World Cement Directory*

Tableau 2.1.3. Types de four utilisés.

Nombre de fours à voie sèche	16
Nombre de fours à voie humide	3
Nombre de fours à voie semi-humide	0
Nombre de fours à voie semi-sèche	0
Nombre de fours verticaux	0
Total fours	19

Source : *World Cement Directory 2002*

2.1.2. ÉGYPTÉ

Introduction

L'Égypte est un pays arabe situé au nord de l'Afrique, au bord de la mer Méditerranée. Sa superficie totale est de 1 001 450 km² et sa population est d'environ 66,4 millions d'habitants.

Outre la capacité agricole de la vallée et du delta du Nil, les ressources naturelles de l'Égypte comprennent le pétrole, le gaz naturel, les phosphates et le minerai de fer. Le pays possède suffisamment de gaz naturel pour satisfaire la demande interne pendant de nombreuses années.

Le secteur industriel est toujours dominé par l'entreprise publique qui contrôle pratiquement toute l'industrie lourde, même si un processus de réformes et de privatisation du secteur public a débuté afin d'augmenter les opportunités du secteur privé. La construction, les services non financiers et le marché intérieur sont en grande partie privatisés, ce qui a favorisé une croissance constante du PIB et du taux de croissance annuelle.

L'Égypte est la deuxième économie du monde arabe. L'économie est dominée par le secteur tertiaire qui représente pratiquement la moitié du PIB.

Tableau 2.1.4. Indicateurs de la situation socio-économique en Égypte.

Superficie	10 ⁶ km ²	1
Population	millions	77,5
Espérance de vie	ans	71
Énergie par habitant	équiv. kg de pétrole	726
PIB actuel	10 ⁹ \$	316,3
Croissance du PIB	%	4,5
PPA du PIB par habitant	\$	4 200

*Source : Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)
(PPA = parité de pouvoir d'achat)*

Industrie et environnement

L'industrie est un des principaux secteurs qui contribuent au développement de l'économie égyptienne. En incluant les usines et les mines, le secteur industriel égyptien contribue au PIB pour environ 20 % et emploie approximativement 14 % de la main-d'œuvre. La capacité de fabrication de l'Égypte se concentre sur relativement peu de secteurs industriels. Sept secteurs représentent plus de 80 % des établissements. Les trois plus importants sont le secteur de l'alimentation et des boissons, le textile et l'industrie chimique, les plus anciens en Égypte. Viennent ensuite le secteur des minerais non métalliques, la production de métaux, les produits chimiques et les métaux de base.

L'Égypte dépend beaucoup de l'importation ; elle doit, par exemple, importer pratiquement la totalité de sa consommation en bois et en papier.

En Égypte, la distribution géographique de l'industrie est très inégale. Actuellement, 41 % de la production industrielle se concentre dans le Grand Caire, 17 % dans le delta du Nil, 16,8 % à Alexandrie et 14,2 % dans la zone du canal de Suez. Les 11 % restants de la production industrielle se situent dans la Haute Égypte. Cette répartition inégale a encouragé le pays à élaborer un nouveau plan destiné à stimuler l'investissement industriel dans de nouvelles régions situées dans les zones non agricoles du pays.

Le secteur public, dominé par les grandes entreprises, occupe une place prédominante dans les industries chimiques et pharmaceutiques, dans l'ingénierie et dans l'électricité. De plus, il possède de grandes usines textiles et des raffineries de sucre.

Le secteur privé, dominé par les petites et moyennes entreprises (PME), inclut les entreprises spécialisées dans l'alimentation et les boissons, les produits lactés, la filature, le tissage et divers types d'artisanat. Parmi les entreprises du secteur privé dégageant les plus grands bénéfices, on trouve la production de petits outils et de petits matériels électriques ainsi que l'impression de tissus et la confection.

Alexandrie est une zone fortement industrialisée qui produit : papier, métal, produits chimiques, produits pharmaceutiques, plastiques, produits alimentaires, huiles, détergents et pétroles. La plus grande partie des déchets générés par cette industrie sont déversés dans le lac Mariout qui est également le lieu de rejet, après traitement, des eaux résiduaires provenant de la station d'épuration d'Alexandrie.

Industrie du secteur du ciment

En raison de la mauvaise situation économique du pays, la consommation de ciment a diminué au cours des dernières années. La consommation nationale de ciment en 2002 a été de 27,2 Mt et elle a diminué depuis pour descendre à 24,5 Mt en 2004. Entre 85 et 95 % de toutes les ventes de

ciment en Égypte se font encore sous forme de sacs de ciment, ce qui indique bien que le principal demandeur de ciment est l'activité du secteur privé de la construction. En termes de types de ciment, le ciment Portland ordinaire représente la plus grande partie des ventes.

Fin 2004, la production égyptienne de ciment comptait 14 usines avec 2 usines de ciment blanc, ce qui représente une capacité annuelle de 33 Mt de clinker de ciment. Actuellement, le marché du ciment en Égypte est à la recherche d'une expansion continue du secteur.

En 2003, l'Égypte s'est placée parmi les cinq plus grands pays exportateurs de ciment, avec une valeur de 7,4 Mt, ce qui représentait une croissance de 5,4 % par rapport à l'année précédente. Le nombre d'entreprises égyptiennes exportatrices de ciment est passé de 6 en 2002 à 13 fin 2003. Les marchés approvisionnés dans le monde entier sont nombreux. Au Moyen-Orient, les plus importants sont le Yémen et le Soudan ; en Europe, ce sont l'Espagne et l'Italie. Elle exporte également vers certains pays de l'Ouest de l'Afrique et vers les États-Unis.

Étant donné que la production est très supérieure à la consommation nationale, les importations de ciment sont minimes, ce qui est très différent de la situation des années 90 où l'on importait environ 5 Mt pour la consommation locale. À l'heure actuelle, cette valeur n'atteint pas 0,1 Mt.

Tableau 2.1.5. Données principales de l'industrie du ciment en Égypte. Année 2004.

Production (kt/an)	31 000
Consommation de ciment (kt/an)	24 500
Nombre d'usines intégrées	14
Effectifs approximatifs	6 029
Capacité de production des fours à clinker kt/an	33 000
Capacité de production en ciment kt/an	38 000

Source : *Global Cement Report 2005*

Tableau 2.1.6. Types de four utilisés.

Nombre de fours à voie sèche	27
Nombre de fours à voie humide	12
Nombre de fours à voie semi-humide	5
Nombre de fours à voie semi-sèche	1
Nombre de fours verticaux	0
Total fours	45

Source : *World Cement Directory 2002*

2.1.3. LIBAN

Introduction

Le Liban est un pays arabe situé dans la région du Moyen-Orient et au bord de la mer Méditerranée. Sa superficie totale est de 10 400 km² et sa population est d'environ 4,4 millions d'habitants.

Le Liban possède un système compétitif de libre marché et une forte tradition commerciale de laissez-faire. L'économie libanaise est orientée principalement vers les services ; les principaux secteurs en croissance sont la banque et le tourisme.

Tableau 2.1.7. Indicateurs de la situation socio-économique au Liban.

Superficie	10 ³ km ²	10,4
Population	millions	3,82
Espérance de vie	ans	72,63
Énergie par habitant	équiv. kg de pétrole	1 169
PIB actuel	10 ⁹ \$	18,83
Croissance du PIB	%	4
PPA du PIB par habitant	\$	5 000

Source : Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)
(PPA = parité de pouvoir d'achat)

Industrie et environnement

En 1999 le Liban comptait plus de 22 000 unités industrielles, selon le ministère de l'industrie et 29 282 selon l'administration centrale des statistiques, chiffre qui représente une augmentation d'environ 50 % par rapport au début des années 90. Plus de 90 % de ces entreprises sont des micro-industries avec moins de 10 employés.

L'industrie se concentre dans le Grand Beyrouth et sur le mont Liban. En raison du manque de planification urbaine, la plupart des petites industries et des micro-industries se trouvent dans les zones résidentielles, en dehors des zones industrielles (95,6 % des industries dans le Grand Beyrouth et 75,3 % sur le mont Liban). Cependant, les grandes entreprises (spécialisées dans l'industrie alimentaire, les textiles, les produits chimiques et les ciments et matériaux de construction) sont en général situées dans les zones industrielles.

Les données indiquent que la reprise du secteur industriel a été surprenante, malgré les ravages de la guerre. Entre 2001 et 2010, on prévoit un taux de croissance du secteur entre 8 et 10 %.

Environ 89 % des industries appartiennent à sept sous-secteurs principaux : alimentation et boissons (20 %), fabrication de métaux (16 %), minerais non métalliques (12 %), mobilier (11 %), tissus et finitions textiles (16 %), produits du bois (10 %) et tannage (6 %).

La majorité des installations industrielles ne sont pas équipées de systèmes de contrôle de la pollution et elles déversent leurs déchets pollués dans les eaux du littoral et les eaux superficielles, ce qui entraîne un risque élevé de pollution des eaux superficielles et souterraines. De plus, des déchets industriels solides et des émissions atmosphériques sont rejetés de façon incontrôlée.

Industrie du secteur du ciment

La consommation de ciment au Liban diminue constamment en raison de la dette de l'État, ce qui se traduit par une chute de 50 % de la consommation par personne, passant de 1 200 kilos en 1997 à 681 kilos à l'heure actuelle. Le marché du ciment est relativement peu sophistiqué, 80 % du ciment est utilisé en sacs et les 20 % restants en vrac.

Le Liban possède actuellement quatre usines de ciment, ce qui représente une production totale de 4,8 Mt par an. Cette production est plus importante que la consommation et il existe donc un excès de capacité pour le pays. Le gouvernement libanais a interdit les importations en 1999. En ce qui concerne les exportations, le Liban a exporté 1 Mt en Irak en 2004 et il lutte pour maintenir ce niveau et ouvrir l'exportation vers d'autres pays ; on prévoit donc une croissance des exportations du pays dans ce secteur.

Tableau 2.1.8. Données principales de l'industrie du ciment au Liban. Année 2004.

Production (kt/an)	2 592
Consommation de ciment (kt/an)	12 000
Nombre d'usines intégrées	4
Effectifs approximatifs	6 029
Capacité de production des fours à clinker kt/an (*)	4.416
Capacité de production en ciment kt/an	4 800

Source : *Global Cement Report 2005*
(*) Année 2002. *World Cement Directory*

Tableau 2.1.9. Types de four utilisés.

Nombre de fours à voie sèche	8
Nombre de fours à voie humide	0
Nombre de fours à voie semi-humide	0
Nombre de fours à voie semi-sèche	0
Nombre de fours verticaux	0
Total fours	8

Source : *World Cement Directory 2002*

2.1.4. GRANDE JAMAHIRIYA ARABE LIBYENNE POPULAIRE ET SOCIALISTE

Introduction

La Lybie est un pays arabe situé au nord de l'Afrique au bord de la mer Méditerranée. Sa superficie totale est de 1 759 000 km² et sa population est d'environ 5,5 millions d'habitants.

Le gouvernement domine l'économie à orientation socialiste de la Lybie, en exerçant le contrôle total des ressources pétrolières du pays, qui représentent environ 95 % des revenus de l'exportation et 30 % du produit intérieur brut. Les revenus générés par le pétrole et une population peu élevée permet à la Lybie de profiter d'un des PIB (et d'une parité de pouvoir d'achat du PIB) les plus élevés d'Afrique. Malgré les efforts réalisés pour diversifier l'économie et favoriser la participation du secteur privé, le contrôle généralisé des prix, les crédits, le commerce et les devises gênent la croissance.

Les secteurs de la construction et de la production qui ne sont pas en relation avec le pétrole, lesquels représentent environ 20 % du PIB, étaient auparavant composés pratiquement exclusivement par les industries de transformation des produits agricoles ; ils comprennent aujourd'hui des industries pétrochimiques, sidérurgiques et des industries de l'aluminium.

Tableau 2.1.10. Indicateurs de la situation socio-économique en Libye.

Superficie	10 ⁶ km ²	1,76
Population	millions	5,7
Espérance de vie	ans	76,5
Énergie par habitant	équiv. kg de pétrole	3 107
PIB actuel	10 ⁹ \$	37,48
Croissance du PIB	%	4,9
PPA du PIB par habitant	\$	6 700

*Source : Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)
(PPA = parité de pouvoir d'achat)*

Industrie et environnement

Comme indiqué précédemment, le développement industriel de la Libye a dépendu jusqu'à présent en grande partie du secteur du pétrole, aussi bien pour ce qui est des revenus générés par les investissements que pour l'importation de matières premières. Les activités industrielles comptent les secteurs dépendant du pétrole (exploration, production, transport et commerce des produits dérivés du pétrole), ainsi que les secteurs de la sidérurgie, des engrais, du ciment, des produits chimiques et de la transformation des aliments.

Jusqu'au début des années 80, tout le secteur industriel était planifié par le gouvernement qui avait le contrôle de la production industrielle considérée comme sensible ou dont la taille n'était pas à la portée du secteur privé du pays. Cependant, la politique actuelle du gouvernement tend à libérer l'industrie, y compris celle de transformation, de sa dépendance vis-à-vis de la propriété et du contrôle étrangers. Le gouvernement concentre son attention sur le développement des industries pétrochimiques et pétrolières.

L'industrie de transformation des aliments est la première du secteur de la production, suivie par d'autres industries importantes, telles que le textile et les usines d'engrais et d'équipements d'ingénierie.

Même si le rejet des déchets industriels non traités dans les systèmes d'égouts est une pratique courante parmi les PME des villes libyennes, on considère que cela ne crée pas de graves problèmes de pollution. Les grandes installations de raffinerie de pétrole, pétrochimiques, sidérurgiques, chimiques, les industries d'engrais et de textiles finis sont situées en grande partie au bord du littoral, en particulier dans le golfe de Surt. Ces industries réalisent fréquemment des rejets de déchets non traités dans la Méditerranée, directement avec des exutoires en mer.

Industrie du secteur du ciment

La Libye a amorcé une phase prometteuse de développement et les nouveaux investissements des entreprises internationales prévoient le développement de nombreuses infrastructures. Le secteur de la construction sera alors un des plus prospères du pays, ce qui entraînera une croissance importante des niveaux de consommation nationale de ciment.

La capacité de production annuelle de ciment en Libye est de 6,5 Mt réparties sur les sept usines dont quatre représentent une capacité de 1 Mt, une de 800 000 t et une autre de 350 000 t.

La consommation de ciment suit de près la production nationale et la Libye n'importe généralement que de petites quantités de ciment en provenance d'Égypte. L'Extrême-Orient compte parmi ses autres fournisseurs.

Tableau 2.1.11. Données principales de l'industrie du ciment en Libye. Année 2004.

Production (kt/an)	3 500
Consommation de ciment (kt/an)	3 500
Nombre d'usines intégrées	7
Effectifs approximatifs	6 029
Capacité de production des fours à clinker kt/an	6 100
Capacité de production en ciment kt/an	6 500

Source : *Global Cement Report 2005*

Tableau 2.1.12. Types de four utilisés.

Nombre de fours à voie sèche	11
Nombre de fours à voie humide	0
Nombre de fours à voie semi-humide	0
Nombre de fours à voie semi-sèche	0
Nombre de fours verticaux	0
Total fours	11

Source : *World Cement Directory 2002*

2.1.5. MAROC

2.1.5.1. Introduction

Le Maroc est un pays arabe situé au nord de l'Afrique, au bord de la mer Méditerranée. Sa superficie totale est de 446 550 km² et sa population est d'environ 32,725 millions d'habitants.

L'économie marocaine est de plus en plus diversifiée. Le Maroc possède d'importantes réserves de minerai, un secteur agricole (pêche comprise) diversifié, une vaste industrie touristique et un secteur des industries de transformation en développement (principalement centré sur la confection).

Environ un tiers du secteur de l'industrie de transformation est en relation avec les phosphates et un autre tiers avec l'agriculture. Le tiers restant se divise entre l'industrie textile, la confection et la métallurgie.

Depuis les années 80, le gouvernement marocain a suivi un programme de réformes économiques avec le soutien du Fonds monétaire international et de la Banque mondiale. Au cours de la dernière décennie, les réformes ont contribué à augmenter le revenu par habitant, à diminuer l'inflation et à réduire le déficit budgétaire. Cependant, la croissance de la population, la migration des zones rurales vers les zones urbaines et l'augmentation de la main-d'œuvre active ont contribué à une augmentation du chômage urbain, malgré la forte croissance économique et la création de nouveaux emplois.

Tableau 2.1.13. Indicateurs de la situation socio-économique au Maroc.

Superficie	10 ⁶ km ²	0,45
Population	millions	32,72
Espérance de vie	ans	70,66
Énergie par habitant	équiv. kg de pétrole	359
PIB actuel	10 ⁹ \$	134,6
Croissance du PIB	%	4,4
PPA du PIB par habitant	\$	4 200

*Source : Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)
(PPA = parité de pouvoir d'achat)*

Industrie et environnement

Le Maroc possède une des industries de minerais les plus importantes d'Afrique et son industrie pétrolière représente un sous-secteur essentiel de l'économie du pays. De son côté, l'industrie chimique enregistre un nouvel essor grâce à l'exploitation de la richesse que représentent les phosphates.

Dans le secteur parachimique, l'industrie pharmaceutique se distingue et le pays est un des principaux marchés de l'industrie des lubrifiants en Afrique. L'industrie textile et celle du tannage représentent environ un quart de la production industrielle totale. En ce qui concerne la transformation des aliments, les principales industries sont la production de sucre, les moulins à farine et les produits lactés. Le Maroc possède également plusieurs usines de ciment.

En ce qui concerne les activités du secteur de la production, leur décomposition par sous-secteur est la suivante :

- industrie agroalimentaire (35 %, avec plus de 1 641 entreprises) ;
- industrie chimique et parachimique (33 %, avec 1 963 entreprises) ;
- industrie du textile et du tannage (17 %, avec 1 744 entreprises) ;
- industrie mécanique, électrique et électronique (12 % correspondant aux industries électriques et mécaniques et 3 % aux industries électroniques avec plus de 1 051 entreprises en tout).

Au Maroc, 95 % du total de la fabrication est produit par des petites et moyennes entreprises (PME). Plus de 14 000 PME sont réparties dans les centres urbains et les enclaves industrielles du pays, avec environ 50 % des grandes installations situées à Casablanca, dans la région d'El Mohammedia. Leur contribution au PIB est de 36 % et elles fournissent 52 % du total des emplois. La présence des PME dans les zones urbaines très peuplées a des conséquences négatives sur l'environnement ainsi que sur la population.

Les activités industrielles, plus particulièrement les secteurs chimique, parachimique et agroalimentaire (sucre et huile végétale), le textile et le tannage, ont des impacts négatifs sur l'environnement, et en particulier sur les ressources hydriques. La pollution des eaux superficielles provoquées par les activités industrielles est élevée, en particulier dans les bassins du Sebu et de l'Oum er-R'bia.

Industrie du secteur du ciment

Le marché de la consommation de ciment au Maroc a augmenté de 9,3 % en 2003 pour atteindre environ 9,3 Mt, avec une consommation par habitant d'environ 300 kg. Cette situation répond à la croissance de l'activité de la construction, en raison du développement de l'industrie du tourisme.

Casablanca représente le plus grand marché de ciment du pays, soit une consommation s'élevant à 15 % du total. Dans le secteur du ciment au Maroc, le ciment en sac tient la place principale, mais avec le développement de l'industrie marocaine l'utilisation de ciment en vrac prend de l'importance.

La capacité de production de ciment est de 11 Mt par an réparties sur 12 usines. Cependant, en raison d'une augmentation continue de la consommation de ciment pour les raisons expliquées précédemment, on estime atteindre une production de 12,65 Mt en 2008.

Les exportations de ciment ont diminué de 21 % en 2003 et 2004 en raison de l'augmentation de la demande nationale. L'Espagne, en particulier les îles Canaries, est le principal marché vers lequel le Maroc exporte du clinker, tandis qu'il exporte du ciment vers les pays africains, tels que la Mauritanie, la Gambie et la Guinée.

Dans le domaine des importations, la première place est tenue par l'importation de clinker de ciment blanc provenant d'Espagne, de Grèce et de Turquie.

Tableau 2.1.14. Données principales de l'industrie du ciment au Maroc. Année 2004.

Production (kt/an)	9 900
Consommation de ciment (kt/an)	9 700
Nombre d'usines intégrées	12
Effectifs approximatifs	6 029
Capacité de production des fours à clinker kt/an (*)	7 600
Capacité de production en ciment kt/an	11 000

Source : *Global Cement Report 2005*
(*). Année 2002. *World Cement Directory*

Tableau 2.1.15. Types de four utilisés.

Nombre de fours à voie sèche	10
Nombre de fours à voie humide	1
Nombre de fours à voie semi-humide	2
Nombre de fours à voie semi-sèche	2
Nombre de fours verticaux	0
Total fours	15

Source : *World Cement Directory 2002*

2.1.6. RÉPUBLIQUE ARABE DE SYRIE

Introduction

La Syrie est un pays arabe situé dans la région du Moyen-Orient et au bord de la mer Méditerranée. Sa superficie totale est de 185 180 km² et sa population est d'environ 18,45 millions d'habitants.

C'est un pays en voie de développement, aux revenus intermédiaires et avec une économie diversifiée basée sur l'agriculture, l'industrie et un secteur énergétique en expansion.

Malgré les importantes réformes et les projets de développement mis en place au début des années 90, l'économie de la Syrie continue à subir l'influence négative d'entreprises publiques à faible rendement, d'un niveau d'investissement faible et d'une productivité industrielle et agricole

relativement faible. L'industrie du pétrole représente près des trois quarts des revenus de l'exportation.

Le gouvernement a reconduit ses priorités de développement économique, allant de l'expansion industrielle jusqu'aux divers secteurs de l'agriculture, afin d'atteindre une autosuffisance, d'augmenter les revenus de l'exportation et de retenir les migrations des zones rurales.

Tableau 2.1.16. Indicateurs de la situation socio-économique en Syrie.

Superficie	10 ³ km ²	185
Population	millions	18,45
Espérance de vie	ans	70,03
Énergie par habitant	équiv. kg de pétrole	1 137
PIB actuel	10 ⁹ \$	60,44
Croissance du PIB	%	2,3
PPA du PIB par habitant	\$	3 400

*Source : Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)
(PPA = parité de pouvoir d'achat)*

Industrie et environnement

Le tissu industriel syrien est très diversifié. Les secteurs les plus importants, contrôlés principalement par l'État, sont le secteur alimentaire, le textile, la chimie, l'ingénierie et le ciment. Néanmoins, le secteur privé a commencé à émerger dans les industries textiles, alimentaires et du ciment.

La Syrie considère que la qualité est un facteur décisif pour survivre à la concurrence du commerce industriel mondial, et elle prête une attention toute particulière à faire connaître les concepts de la gestion totale de la qualité (GTQ) et de la production plus propre (PP). Elle encourage l'obtention de certifications ISO par les industries nationales.

La plupart des industries sont des PME et les principales zones d'activité se concentrent aux alentours de Damas, d'Alep et de Homs.

Les principaux polluants générés par ces industries sont des eaux résiduaires et des émissions atmosphériques. Les déchets solides ne sont pas une priorité parce que les entreprises les recyclent et les réutilisent, ou les vendent pour d'autres utilisations.

Le traitement qui doit être appliqué aux déchets générés est très coûteux pour ce type d'entreprise qui ne peut pas l'assumer sans aide économique ou subventions. C'est pourquoi le traitement des polluants dépend de la disponibilité de techniques à faible coût dans le contexte des normes et des exigences actuelles.

Le gouvernement actuel a montré sa détermination en faveur d'une augmentation significative des sommes prévues pour la protection de l'environnement et en faveur des services publics correspondants dans les budgets des ministères et des institutions concernés.

Industrie du secteur du ciment

En Syrie, en 2004, la consommation de ciment par habitant était de 304 kg. Cette valeur est moins importante dans la moitié est de la région dans lequel le secteur de la construction amorce actuellement son démarrage. Des données officielles montrent que la consommation de ciment en Syrie a atteint un pic historique de 6,4 Mt en 2004, supérieur aux 5,5 Mt de l'année précédente.

La production de ciment de base en Syrie est réalisée dans huit usines contrôlées par neuf compagnies nationales qui se répartissent une production totale de clinker de ciment de 4,83 Mta. On espère atteindre cette année les 5 Mt.

La voie sèche est le procédé le plus utilisé dans la production de ciment et elle permet d'obtenir une économie d'énergie significative. Cependant, la plupart des lignes de production ne sont pas équipées de systèmes modernes de contrôle de la pollution.

L'industrie du ciment a été jusqu'à présent un monopole public. Elle s'ouvre actuellement au secteur privé, ce qui attire l'intérêt des investisseurs étrangers d'Arabie Saoudite, d'Égypte, de Turquie et de Chine.

OMRAN est la seule entreprise autorisée à importer du ciment et ses importations du Liban, de la Jordanie, de l'Égypte et de la Turquie ont augmenté ces dernières années. En 2004, elles ont atteint 1,2 Mt sans pour autant satisfaire la demande existante.

Tableau 2.1.17. Données principales de l'industrie du ciment en Syrie. Année 2004.

Production (kt/an)	5 200
Consommation de ciment (kt/an)	6 400
Nombre d'usines	8
Effectifs approximatifs	6 775
Capacité de production des fours à clinker kt/an	4 830
Capacité de production en ciment kt/an (*)	6 010

Source : *Global Cement Report 2005*
(*) Année 2002. *World Cement Directory*

Tableau 2.1.18. Types de four utilisés.

Nombre de fours à voie sèche	12
Nombre de fours à voie humide	6
Nombre de fours à voie semi-humide	0
Nombre de fours à voie semi-sèche	0
Nombre de fours verticaux	0
Total fours	18

Source : *World Cement Directory 2002*

2.1.7. TUNISIE

Introduction

Le Tunisie est un pays arabe situé au nord de l'Afrique, au bord de la mer Méditerranée. Sa superficie totale est de 163 610 km² et sa population est d'environ 10,07 millions d'habitants.

Depuis toujours, la croissance économique de la Tunisie a dépendu du pétrole, des phosphates, de l'agriculture et du tourisme. Les politiques économiques du gouvernement ont eu peu de succès pendant les premières années d'indépendance. En 1986, l'État a lancé un programme d'ajustement structurel destiné à libéraliser les prix, à réduire les tarifs et à rediriger la Tunisie vers une économie de marché.

Depuis l'application du programme de stabilisation, la croissance de la production intérieure, mesurée en fonction de la croissance réelle du PIB, est passée de 2,8 % entre 1982 et 1986 à 4,8 %

entre 1991 et 2001. Parallèlement, l'inflation et le déficit à monnaie constante ont baissé de façon significative.

En 1990, la Tunisie a adhéré à l'accord général sur les tarifs douaniers et le commerce (GATT). Par ailleurs, en 2002 le gouvernement avait déjà privatisé 163 entreprises publiques.

Le chômage est toujours très élevé pour l'économie du pays (avec un taux de 15 % de la population active) et il est aggravé par la croissance rapide de la main-d'œuvre.

Tableau 2.1.19. Indicateurs de la situation socio-économique en Tunisie.

Superficie	10 ³ km ²	163,6
Population	millions	10,07
Espérance de vie	ans	74,89
Énergie par habitant	équiv. kg de pétrole	825
PIB actuel	10 ⁹ \$	70,88
Croissance du PIB	%	5,1
PPA du PIB par habitant	\$	7 100

*Source : Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)
(PPA = parité de pouvoir d'achat)*

Industrie et environnement

Le secteur de la production est devenu l'un des plus dynamiques de l'économie tunisienne, avec une nette tendance vers la privatisation de l'industrie, dans le cadre des programmes de restructuration économique. Même si le secteur tertiaire domine l'économie, l'industrie est toujours un des principaux secteurs contribuant à la croissance du PIB (près de 20 % en 1999), à la création d'emplois et à la génération d'une monnaie forte grâce aux exportations.

Selon les données dont on dispose, en 2001 le secteur industriel tunisien était constitué de 5 262 entreprises de 10 employés ou plus, dont 2 292 étaient consacrées exclusivement à l'exportation. Par rapport aux secteurs industriels, le secteur textile représentait 41 % de l'industrie du pays, suivi par le secteur de la transformation des d'aliments avec 15 % et par le secteur des matériaux de construction, de la céramique et du verre avec 8 %.

Les principaux problèmes de pollution sont liés à une consommation démesurée en eau et en énergie et à la génération importante de déchets solides.

Industrie du secteur du ciment

Le secteur du ciment de la Tunisie, de même que les autres secteurs de l'économie, s'ouvre à un processus de privatisation.

Outre la construction d'autres infrastructures, la Tunisie mène actuellement un programme de construction d'autoroutes pour relier le centre aux routes côtières, ce qui représente un moteur important pour l'industrie du ciment.

La consommation de ciment en 2003 a été de 5 Mt, avec une consommation de 500 kg par habitant. La Tunisie se trouve donc, en termes de consommation de ciment, devant les autres pays africains y compris le Maroc et l'Égypte. En 2004, la demande en consommation de ciment a augmenté jusqu'à 5,3 Mt et une croissance annuelle située entre 4 et 8 % est attendue à court et moyen terme.

La Tunisie possède actuellement six usines de ciment, dont quatre sont privatisées et sont en phase de modernisation. La capacité de production de clinker de la Tunisie est de 6,3 Mt par an ; on espère

toutefois que cette valeur passera à 6,7 Mt lorsque la modernisation des quatre usines privatisées sera totalement terminée entre 2005 et 2006.

Les importations sont minimales à l'heure actuelle et la Tunisie est passée, depuis 2003, du statut d'importateur de ciment et de clinker à celui d'exportateur.

Tableau 2.1.20. Données principales de l'industrie du ciment en Tunisie. Année 2004.

Production (kt/an)	6 000
Consommation de ciment (kt/an)	5 300
Nombre d'usines	6
Effectifs approximatifs	3 219
Capacité de production des fours à clinker kt/an	6 300
Capacité de production en ciment kt/an	7 100

Source : *Global Cement Report 2005*

Tableau 2.1.21. Types de four utilisés.

Nombre de fours à voie sèche	10
Nombre de fours à voie humide	3
Nombre de fours à voie semi-humide	0
Nombre de fours à voie semi-sèche	0
Nombre de fours verticaux	0
Total fours	13

Source : *World Cement Directory 2002*

2.2. PAYS DU NORD DE LA MÉDITERRANÉE

Les cinq pays du nord de la Méditerranée qui composent ce groupe, à savoir Grèce, France, Italie, Monaco et Espagne, sont considérés comme des États européens à revenus élevés et ils sont tous membres de l'Union européenne (UE) à l'exception de Monaco. Ces pays partagent l'obligation de répondre aux normes de l'UE et de transposer ses directives dans leur droit national à brève échéance. De même, ils sont obligés d'adopter les mesures nécessaires pour satisfaire les normes européennes.

Industrie et environnement

L'état de l'environnement dans l'Union européenne a empiré constamment au cours des dernières décennies. Environ 2 milliards de tonnes de déchets sont générés chaque année et ce chiffre va en augmentant. C'est pour cette raison que la protection de l'environnement est un des principaux défis auxquels l'Europe doit faire face.

Comme dans les autres états membres de l'UE, le secteur industriel dans les pays du nord de la Méditerranée est très hétérogène. Il présente de grandes différences entre les régions et il est souvent concentré près des zones urbaines très peuplées. L'industrie a été forcée d'investir dans des équipements de traitement environnemental pendant de nombreuses années et d'adopter des technologies plus respectueuses de l'environnement. Une des principales activités industrielles est la production automobile, ce qui représente une différence quantitative et qualitative par rapport aux autres zones de la Méditerranée. Cette caractéristique prend une importance particulière dans l'analyse de l'effet de la chaîne logistique, qui facilite la diffusion de la production plus propre et des systèmes de gestion environnementale.

Cadre politique et légal

En tant qu'États membres de l'UE, les pays de la région nord de la Méditerranée, à l'exception de Monaco, sont soumis aux normes européennes.

Les mesures environnementales sont normalement adoptées au moyen de directives ou de règlements proposés par la Commission européenne, qui doivent être acceptés par le Conseil européen. Une fois ces mesures adoptées, la Commission se charge de contrôler leur application. La Direction générale de l'environnement est l'organisme de la Commission chargé des questions telles que l'environnement, la sécurité nucléaire et la protection civile.

Pendant les années 70 et 80, la législation environnementale de l'UE consistait principalement à établir des limites d'émission pour certains polluants. Vers les années 90, des initiatives de plus grande envergure ont été mises en place, telles que la régulation de la consommation de ressources naturelles ou la prévention de la pollution par des normes « horizontales ».

Une grande partie de ces normes ont été adoptées au cours du cinquième programme d'action en matière d'environnement de la Communauté européenne, qui définissait la stratégie environnementale de l'UE pour la période 1992-2000. Le programme comprenait une approche intégrée de lutte contre la pollution et des actions pour réduire les déchets ; ces actions ont été transposées dans la directive IPPC, qui coïncide en grande partie avec les principes de la PP.

Avec la directive IPPC, l'UE a introduit le concept des meilleures techniques disponibles (MTD) et a lancé la publication de documents de consultation, les BREF, où sont décrites les solutions de PP adoptées par certains secteurs et appliquées à des technologies concrètes.

L'objectif de cette directive est de prévenir ou de réduire au minimum la pollution atmosphérique, du sol et de l'eau produite par les émissions des installations industrielles des pays membres, afin d'atteindre un plus haut niveau de protection environnementale. La directive IPPC définit les obligations minimales que doivent remplir toutes les usines concernées, nouvelles ou existantes. Ces obligations minimales constituent une liste de mesures de prévention de la pollution de l'atmosphère, du sol et de l'eau causée par les déchets industriels et les autres déchets. Elles servent de base à la rédaction des permis d'exploitation des installations industrielles.

2.2.1. ESPAGNE

Introduction

L'Espagne est un pays européen industrialisé situé sur la partie occidentale du bassin méditerranéen. Sa superficie totale est de 504 750 km² et sa population est d'environ 44 millions d'habitants.

Tableau 2.2.1. Indicateurs de la situation socio-économique en Espagne.

Superficie	10 ³ km ²	504,8
Population	millions	44
Espérance de vie	ans	79,52
Énergie par habitant	équiv. kg de pétrole	3 084
PIB actuel	10 ⁹ \$	937,6
Croissance du PIB	%	2,6
PPA du PIB par habitant	\$	23 300

*Source : Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)
(PPA = parité de pouvoir d'achat)*

L'emploi a considérablement augmenté, ce qui a permis une croissance plus rapide de l'économie que la moyenne de la zone Euro.

Au cours des dernières années, le comportement économique de l'Espagne a fait preuve d'une grande vitalité grâce aux réformes structurelles menées depuis le milieu des années 90 et à la stabilité du cadre politique macro-économique.

Industrie et environnement

L'Espagne, grâce à son développement rapide sur les 25 dernières années, est devenue la huitième économie mondiale parmi les pays de l'OCDE. Dans beaucoup de cas, cette croissance a été accompagnée d'une plus grande pression sur l'environnement, que ce soit en raison de l'utilisation de ressources naturelles (eau, sol, etc.) ou en raison de la pollution.

Les principales industries du pays sont l'alimentation et les boissons, les industries métallurgiques, les produits chimiques, les chantiers navals, l'industrie automobile, la machine-outil, l'industrie textile, la confection et le tourisme. Les marchandises les plus exportées par l'Espagne sont les machines, les véhicules motorisés et les produits d'alimentation et de consommation.

Les plus grandes menaces pour l'environnement sont causées par le transport, la production d'énergie électrique et l'agriculture.

Industrie du secteur du ciment

L'Espagne maintient sa position de leader du marché du ciment en Europe et dans les pays du PAM ; sa consommation est de 1 127 kg par habitant, ce qui représente une valeur assez élevée. La consommation de ciment en Espagne a augmenté d'environ 3,9 % pour atteindre 48 Mt en 2004.

L'industrie du génie civil représentait 41 % de la consommation en 2004 et 44 % en 2003. Le marché de la construction est devenu plus important et il est passé de 56 à 59 % de la consommation de ciment en 2004.

Parmi les communautés autonomes, l'Andalousie est le marché de ciment le plus important en Espagne avec une augmentation de 14,2 % par rapport à 2003. Elle est suivie par Valence, la Catalogne et la côte méditerranéenne avec une croissance de 7,7 % par rapport à 2003.

En 2004, la production nationale a atteint 46,6 Mt, se répartissant sur 36 usines intégrées, en plus d'une douzaine d'usines de broyage.

Il existe dix groupes en Espagne qui produisent aussi bien du clinker que du ciment. Les trois groupes les plus importants sont Cemex, Cementos Pórtland Valderrivas et Holcim, qui se répartissent la moitié de la consommation de ciment sur le plan national. Près de 88 % de la consommation est acheminée par route, 10 % par mer et 2 % par train.

Les exportations de ciment ont continué à diminuer. Près de 0,3 Mt des 1,3 Mt exportées sont du ciment blanc et environ 18 000 t sont du clinker. Les États-Unis représentent le marché des exportations espagnoles le plus important avec 0,28 Mt.

Les importations de ciment et de clinker en 2004 ont augmenté de presque 10 % l'année dernière jusqu'à 8,2 Mt. Dans ce total, les importations de ciment ont diminué de 2,3 Mt en 2003 et sont passées à 1,9 Mt en 2004, alors que les importations de clinker ont augmenté de 5,9 Mt en 2003 à 6,3 Mt en 2004. L'Égypte est le premier marché des importations espagnoles avec 3,5 Mt et un taux de croissance de 119 %.

Tableau 2.2.2. Données principales de l'industrie du ciment en Espagne. Année 2004.

Production (kt/an)	45 500
Consommation de ciment (kt/an)	47 200
Nombre d'usines intégrées	36
Effectifs approximatifs	7 000
Capacité de production des fours à clinker kt/an (*)	35 300
Capacité de production en ciment kt/an	56 000

Source : *Oficemen*

Tableau 2.2.3. Types de four utilisés.

Nombre de fours à voie sèche	53
Nombre de fours à voie humide	3
Nombre de fours à voie semi-humide	0
Nombre de fours à voie semi-sèche	4
Nombre de fours verticaux	0
Total fours	60

Source : *Oficemen2004*

2.2.2. FRANCE

Introduction

La France est un pays européen industrialisé dont la partie méridionale borde la mer Méditerranée. Sa superficie totale est de 547 000 km² et sa population est d'environ 60,66 millions d'habitants.

Tableau 2.2.4. Indicateurs de la situation socio-économique en France.

Superficie	10 ³ km ²	547
Population	millions	60,66
Espérance de vie	ans	79,6
Énergie par habitant	équiv. kg de pétrole	4 366
PIB actuel	10 ⁹ \$	1,74
Croissance du PIB	%	2,1
PPA du PIB par habitant	\$	28 700

Source : *Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)*
(PPA = parité de pouvoir d'achat)

La France est la quatrième économie industrialisée occidentale. Elle possède d'importantes ressources agricoles, une base industrielle vaste et consolidée ainsi qu'une main-d'œuvre hautement qualifiée. Elle possède également un secteur tertiaire dynamique dont l'activité économique augmente de plus en plus et qui est responsable de pratiquement toutes les créations d'emploi de ces dernières années.

La France a développé avec un succès remarquable les secteurs des télécommunications, de l'aérospatiale et de l'armement. En ce qui concerne la production d'énergie, le pays s'est concentré surtout sur le développement de l'énergie nucléaire, qui représente aujourd'hui environ 80 % de la

production électrique du pays. Les déchets nucléaires sont stockés dans des installations de retraitement sur le territoire français.

Industrie et environnement

La France est le quatrième pays producteur industriel du monde. L'industrie manufacturière est très diversifiée et représente la source principale des revenus provenant des exportations.

Les principaux secteurs industriels sont :

- *L'industrie de l'alimentation* : actuellement, le secteur de l'industrie de l'alimentation est celui qui génère le plus grand nombre de postes de travail dans le pays. La France est le principal producteur de betterave sucrière du monde et le deuxième producteur de vin et de fromage. Parmi les produits alimentaires importants on retrouve la viande, le pain et les sucreries ;
- *La fabrication de voitures, d'avions, de bateaux et de trains* : la France est le quatrième producteur automobile mondial et elle possède également une industrie importante de fabrication de bateaux, d'avions et de trains ;
- *Industrie électrique et électronique* : la France produit des équipements pour les télécommunications, des ordinateurs, des téléviseurs, des radios et d'autres articles ;
- *Industrie métallurgique* : la production de fer et d'acier, de même que l'industrie de l'aluminium, représentent une autre source importante d'emplois en France ;
- *Industrie chimique et pharmaceutique* : l'industrie chimique française fournit une large gamme de produits, comprenant des substances chimiques industrielles, des plastiques, des engrais, des solvants, des cosmétiques et des produits pharmaceutiques ;
- *Industrie textile* : elle produit des articles en coton, en soie et en bois.

2.2.2.1. Industrie du secteur du ciment

La consommation de ciment en France a diminué et de 0,2 % en 2003 avec une valeur de 20,68 Mt. Cependant, l'activité croissante au niveau des constructions d'habitation entraînera une croissance de la demande de ce secteur.

L'industrie a représenté 47,3 % de la consommation nationale de ciment en 2003 et 18,2 % pour certains produits. La part de marché du ciment en vrac est passée de 71,1 % en 2002 à 72,2 % en 2003 alors que la consommation de ciment en sac est descendue à 27,8 %.

En termes d'utilisation du ciment, le génie civil représente 38 % de la consommation, suivi par la construction d'habitations avec 36 %, la construction de bâtiments commerciaux et industriels avec 20 % et l'entretien des bâtiments avec 14 %.

La production nationale de ciment est de 27,2 Mt réparties sur 29 usines intégrées, en plus de 5 usines de broyage.

L'utilisation de combustibles alternatifs dans le four est passée de 34 à 33 % en 2003, l'utilisation de pierres calcaires et de scories comme ciment a augmenté alors que l'utilisation de cendres volantes a continué à diminuer.

Le total des exportations françaises a augmenté de 12 % pour atteindre 1,71 Mt en 2003, avec des exportations de ciment supérieures à 8,7 % et des exportations de clinker qui ont augmenté de 17,2 % pour atteindre 0,7 Mt. L'Allemagne est le marché leader des exportations françaises avec 0,3 Mt.

Les importations totales ont diminué de 5 % pour atteindre 2,45 Mt, parmi lesquelles celles de clinker ont diminué de 13,1 % pour descendre à 0,24 Mt et celles de ciment de 4,7 % pour descendre à 2,21 Mt. La Grèce est le principal marché des importations de clinker. L'Espagne et la Belgique sont

les marchés les plus importants pour les importations de ciment, avec 1,02 Mt et 0,45 Mt respectivement.

Tableau 2.2.5. Données principales de l'industrie du ciment en France. Année 2004.

Production (kt/an)	20 900
Consommation de ciment (kt/an)	21 800
Nombre d'usines intégrées	29
Effectifs approximatifs	14 291
Capacité de production des fours à clinker kt/an (*)	21 051
Capacité de production en ciment kt/an	27 200

Source : *Global Cement Report 2005*

(*) Année 2002. *World Cement Directory*

Tableau 2.2.6. Types de four utilisés.

Nombre de fours à voie sèche	20
Nombre de fours à voie humide	2
Nombre de fours à voie semi-humide	1
Nombre de fours à voie semi-sèche	18
Nombre de fours verticaux	3
Total fours	44

Source : *World Cement Directory 2002*

2.2.3. GRÈCE

Introduction

La Grèce est un pays européen industrialisé situé au sud de l'Europe et au bord de la mer Méditerranée. Sa superficie totale est de 131 940 km² et sa population est d'environ 10,6 millions d'habitants.

Tableau 2.2.7. Indicateurs de la situation socio-économique en Grèce.

Superficie	10 ³ km ²	131,9
Population	millions	10,67
Espérance de vie	ans	79,9
Énergie par habitant	équiv. kg de pétrole	2 635
PIB actuel	10 ⁹ \$	226,4
Croissance du PIB	%	3,7
PPA du PIB par habitant	\$	21 300

Source : *Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)*

(PPA = parité de pouvoir d'achat)

L'économie grecque a connu pendant des années une solide croissance, au-dessus de la moyenne prévue pour l'UE. Le secteur tertiaire est celui dont la croissance est la plus importante et la plus rapide. Le tourisme est une des principales sources de revenus en devises du pays, bien que l'industrie ait tardé à se développer et qu'elle souffre d'infrastructures insuffisantes. L'industrie alimentaire, en revanche, a proliféré en réponse aux nouveaux marchés des pays voisins. La

production d'équipements de haute technologie, en particulier dans le domaine des télécommunications, est un des secteurs les plus dynamiques. L'agriculture représente encore 15 % de la main-d'œuvre totale.

Industrie et environnement

Certaines activités économiques de la Grèce dont l'impact sur l'environnement est important sont indiquées ici :

Industrie chimique

Ce secteur a su se conformer aux exigences de qualité environnementale imposées à ses entreprises. Il est d'ailleurs évident que l'industrie chimique grecque a atteint un niveau suffisant d'adaptation aux développements technologiques internationaux en matière de prévention et de contrôle de la pollution, en donnant la priorité à l'intervention à la source.

Industrie papetière / textile / tannage

La plupart des industries papetières grecques répondent à la directive IPPC (directive européenne concernant la prévention et la réduction intégrées de la pollution). Elles utilisent des techniques de production progressives et adoptent la plupart des meilleures techniques disponibles (MTD) rapidement après leur apparition. Cependant, la mauvaise manipulation des équipements diminue parfois l'efficacité de la technologie.

Une seule industrie de tannage (la plus grande en taille et en production) respecte les stipulations de la directive IPPC et a déjà mis en pratique certaines MTD. Dans les autres entreprises du secteur, les MTD et toutes les autres mesures destinées à réduire la pollution sont inexistantes.

L'industrie textile est également très importante en Grèce. Elle génère un nombre d'emplois élevé et contribue significativement aux revenus nationaux, étant donné qu'il s'agit d'un secteur exportateur utilisant principalement de la matière première produite localement (coton). Il existe environ 220 entreprises de différentes tailles dans le secteur textile, dont 75 % sont de taille familiale avec moins de 10 employés. Néanmoins, des entreprises plus grandes se créent actuellement ; les petites affaires disparaissent progressivement.

Une bonne partie des problèmes de pollution de l'eau sont provoqués par les industries de finition des textiles. Les grandes entreprises qui continuent à investir dans les MTD se caractérisent par une amélioration continue, alors que celles qui sont ancrées dans les vieilles pratiques sont en déclin constant. Le principal besoin en ce qui concerne le contrôle de la pollution réside dans le traitement des déchets liquides et l'élimination des boues rouges. Les industries de finition textile se concentrent dans les zones d'Athènes, de Viota et de Salonique

Industrie du ciment, du verre et de la céramique

Le degré d'implantation des technologies comprises dans les MTD est très élevé dans les industries productrices de ciment. En revanche, le niveau actuel de protection environnementale des industries productrices de chaux est loin d'être satisfaisant. Les niveaux stricts d'émissions proposés par le document BREF posent un problème. Les entreprises grecques consacrées à la production d'amiante et de produits dérivés ont apparemment implanté la plus grande partie des MTD, surtout pour des questions de santé et d'hygiène des travailleurs. Les industries du verre, en revanche, ont adopté uniquement certaines mesures de base contre la pollution.

Industries de transformation des métaux

Les petites et moyennes entreprises du secteur ont des problèmes économiques pour mettre en œuvre les nouveaux développements technologiques, contrairement aux grandes industries qui ont

atteint un niveau acceptable d'adaptation aux développements technologiques internationaux en matière de prévention et de contrôle de la pollution, en donnant priorité à l'action à la source.

Secteur de l'énergie

Ce secteur est formé par de grandes usines de combustion de lignite et de pétrole. Les installations disposent de grandes unités de combustion, de traitement de brut et de gaz naturel et de production d'électricité à partir de lignite ou de pétrole, en plus des quatre raffineries existantes.

Industries alimentaires

L'industrie alimentaire est un des secteurs les plus consolidés du pays (avec près d'un tiers du total des unités industrielles) et il est dominé par un grand nombre d'entreprises consacrées à l'élevage de volailles et de porc, au traitement de produits agricoles, à la production d'huile, au traitement et à l'emballage de produits de consommation, de produits lactés, de boissons, etc. Les problèmes de pollution proviennent principalement des petites installations ou des entreprises saisonnières.

Industrie du secteur du ciment

La consommation de ciment a augmenté pour la neuvième année consécutive en 2003, dépassant les 3,5 % de l'année précédente, pour atteindre une valeur estimée à 11 Mt, ce qui donne une consommation de ciment d'1 t par habitant. Il convient de souligner que la croissance au niveau de la demande de ciment a été importante dans la province d'Attique, site des jeux olympiques.

La demande de ciment en sac continue à diminuer et elle a été inférieure à 24 % en 2002 (les données statistiques de 2003 ne sont pas disponibles).

En raison de la géographie de la Grèce et du faible développement de l'infrastructure terrestre, le transport maritime joue un rôle très important dans la distribution intérieure du ciment.

La Grèce présente une capacité de production annuelle de 16,5 Mt, répartie sur 8 usines, propriétés de 3 entreprises différentes. C'est le groupe Heracles qui détient le plus fort taux de vente.

La présence de grandes réserves de chaux proches de la mer permet à la Grèce d'être un pays idéal pour l'exportation de ciment et les trois producteurs sont également exportateurs. En 2002, alors que l'industrie devait faire face à des capacités de production de ciment réduites et une demande domestique croissante, les exportations de clinker de ciment ont diminué considérablement. C'est pour cette raison qu'Heracles a augmenté sa production et a été capable d'exporter une quantité estimée à 0,45 Mt en 2003. Les États-Unis représentent le marché d'exportation du ciment produit le plus important en Grèce, avec près de 0,8 Mt en 2003.

En ce qui concerne les classes de ciment, le ciment gris représente la plus grande partie des exportations à l'exception de l'Albanie et de la Serbie et Monténégro qui importent des quantités importantes de ciment pouzzolanique. Quant au clinker, la France a été la principale destination en 2003.

Tableau 2.2.8. Données principales de l'industrie du ciment en Grèce. Année 2004.

Production (kt/an)	15 700
Consommation de ciment (kt/an)	10 100
Nombre d'usines	8
Effectifs approximatifs	3 423
Capacité de production des fours à clinker kt/an (*)	11 800
Capacité de production en ciment kt/an	16 500

Source. *Global Cement Report 2005*
 (*) Année 2002. *World Cement Directory*

Tableau 2.2.9. Types de four utilisés.

Nombre de fours à voie sèche	15
Nombre de fours à voie humide	0
Nombre de fours à voie semi-humide	0
Nombre de fours à voie semi-sèche	0
Nombre de fours verticaux	0
Total fours	15

Source : *World Cement Directory 2002*

2.2.4. ITALIE

Introduction

L'Italie est un pays européen industrialisé situé dans la région méditerranéenne et qui est entouré par la mer Méditerranée. Sa superficie totale est de 301 200 km² et sa population est d'environ 58,1 millions d'habitants.

Tableau 2.2.10. Indicateurs de la situation socio-économique en Italie.

Superficie	10 ³ km ²	301,2
Population	millions	58,10
Espérance de vie	ans	79,68
Énergie par habitant	équiv. kg de pétrole	2 974
PIB actuel	10 ⁹ \$	1,609
Croissance du PIB	%	1,3
PPA du PIB par habitant	\$	27 700

Source : *Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)*
 (PPA = parité de pouvoir d'achat)

L'Italie est passée d'une économie fondamentalement agricole pour atteindre la cinquième place sur l'échelle mondiale. Ce pays possède de faibles ressources. Une grande partie de sa superficie n'est pas apte à la culture et il est devenu un importateur net d'aliments.

La plupart des matières premières nécessaires à la fabrication et plus de 80 % des sources d'énergie du pays sont importées. La force économique de l'Italie se base sur le traitement et la

fabrication de biens d'équipement, principalement dans des petites et moyennes entreprises familiales.

Industrie et environnement

Les questions environnementales prioritaires les plus importantes sont la pollution atmosphérique dans les villes, la gestion du sol et de l'eau, la gestion des déchets, la conservation de l'environnement et du paysage, le changement climatique, la gestion du transport et la protection des zones côtières et de l'environnement marin.

Les principaux secteurs industriels qui génèrent des déchets toxiques et dangereux sont : l'industrie chimique organique et inorganique, le traitement de surfaces, l'industrie électronique, l'industrie minière et le transport, le recyclage, l'industrie textile, l'industrie de pâtes et de papier, la production d'énergie, l'industrie agroalimentaire et l'industrie du tannage.

L'industrie met en place des mesures de réduction de l'impact dans certains processus et secteurs.

Des progrès importants dans le secteur industriel italien ont permis l'amélioration de la qualité de l'air dans les années 90. Les émissions de SO_x, NO_x, CO, COV (provenant de dissolvants), dioxines et furannes ont diminué ; c'est d'ailleurs le seul secteur qui a réduit les émissions de CO₂. L'Italie a fait de grands progrès pour établir des infrastructures qui permettent de gérer la pollution atmosphérique industrielle.

Industrie du secteur du ciment

Les plans de l'État italien pour la construction de nouvelles infrastructures ont fourni une forte demande de ciment et le génie civil est ainsi le secteur ayant la plus grande consommation. La demande italienne de ciment a augmenté ainsi en 2003 pour atteindre 43,5 Mt.

Le marché italien de ciment est divisé en 20 groupes, composés de 80 usines comprenant 54 usines intégrées et 26 usines de broyage, avec une capacité totale de production de ciment de 58 Mta.

Le total des exportations a diminué d'environ 5 % en 2003 pour descendre à 2,26 Mt. Les exportations de clinker ont été rares et n'ont pas dépassé les 600 000 t, essentiellement vers la Suisse et l'Espagne. L'Albanie garde sa position du plus grand marché d'exportation de l'Italie, avec 22 % des exportations de ciment.

Les importations de ciment ainsi que celles de clinker ont augmenté en 2003, celles de ciment sont passées de 2,1 Mt à 2,2 Mt et celles de clinker de 1,8 Mt à 2,3 Mt. La plupart des importations se font dans la zone de la Méditerranée et de la mer Noire. Au cours de la première moitié 2004, la baisse des importations de ciment a été compensée par une augmentation des importations de clinker, principalement par les usines de broyage indépendantes.

Tableau 2.2.11. Données principales de l'industrie du ciment en Italie. Année 2004.

Production (kt/an)	44 800
Consommation de ciment (kt/an)	45 000
Nombre d'usines	80
Effectifs approximatifs	n.d.
Capacité de production des fours à clinker kt/an (*)	n.d.
Capacité de production en ciment kt/an	58 000

Source : *Global Cement Report 2005*

(*) Année 2002. *World Cement Directory*

Tableau 2.2.12. Types de four utilisés.

Nombre de fours à voie sèche	58
Nombre de fours à voie humide	11
Nombre de fours à voie semi-humide	0
Nombre de fours à voie semi-sèche	39
Nombre de fours verticaux	1
Total fours	109

Source : World Cement Directory 2002

2.2.5. MONACO

Introduction

Monaco est un pays européen situé au bord de la mer Méditerranée. Sa superficie totale est de 1,95 km² et sa population est d'environ 32 409 habitants.

Tableau 3.2.13. Indicateurs de la situation socio-économique à Monaco.

Superficie	km ²	1,95
Population	milliers	32,4
Espérance de vie	ans	79,57
Énergie par habitant	équiv. kg de pétrole	n.d.
PIB actuel	10 ⁹ \$	870
Croissance du PIB	%	0,9
PPA du PIB par habitant	\$	27 000

Source : Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)
(PPA = parité de pouvoir d'achat)

Monaco est un petit pays avec une économie basée principalement sur le secteur financier, commercial et touristique. Le tourisme représente presque 25 % des revenus annuels ; la Principauté de Monaco a été un grand centre de tourisme depuis l'inauguration de son fameux casino en 1856. Monaco se distingue également par ses activités dans le domaine des sciences de la mer.

2.2.5.1. Industrie et environnement

Le secteur industriel de Monaco a réussi un développement considérable en moins d'un siècle. Depuis 1906, quand l'État a financé la construction de la première zone d'activités à Fontvieille, quelques industries s'y sont installées comme l'usine de bière de Monaco, des grands moulins à farine et des entreprises de production de chocolat. Au cours des vingt dernières années, presque 200 000 m² de surface industrielle ont été construits. Le territoire disponible dans la Principauté est si rare que les installations industrielles ont été installées dans des bâtiments allant jusqu'à treize étages.

À l'heure actuelle, Monaco présente une industrie assez diversifiée. Elle possède un grand nombre d'entreprises consolidées dans divers secteurs : 23 appartiennent à l'industrie chimique, pharmaceutique, parapharmaceutique et cosmétique, 13 au traitement de matières plastiques, 21 aux arts graphiques, à l'édition et au cartonnage, 22 à l'industrie électrique et électronique ainsi

qu'au génie mécanique et de précision, 8 au secteur du textile et de la confection et les autres, telles que les entreprises de la construction, représentent un total d'environ 200 entreprises.

Le secteur des produits chimiques, pharmaceutiques et cosmétiques semble être le plus important, mais les entreprises consacrées au traitement de matières plastiques et à la fabrication d'équipements électriques et électroniques ont également une grande importance. D'autres secteurs, tels que ceux liés au génie mécanique, à l'emballage, aux arts graphiques et à la confection sont également importants mais pas dans la même mesure. La pollution de l'eau représente le principal problème environnemental associé à ces secteurs.

Industrie du ciment

Monaco ne possède pas d'usine de production de ciment, ce secteur n'est donc pas important.

2.3. PAYS DE L'EST DE LA MÉDITERRANÉE

Ce groupe comprend des pays présentant une tendance commune à la mise en place d'une législation environnementale similaire à celle de l'Union européenne. Les normes de certains d'entre eux, tels que Chypre, Malte et la Slovénie, sont en cours d'adaptation à celles de l'UE, depuis leur intégration dans l'UE. La Turquie, en tant que pays candidat à l'UE à court ou à moyen terme, est également en cours d'adaptation. D'autres pays, tels que la Bosnie-et-Herzégovine, la Croatie et l'Albanie ont également débuté un processus d'adoption de normes environnementales similaires à celles appliquées dans l'UE. Avec des programmes différents en fonction de leur date d'intégration, les pays candidats à l'entrée dans l'UE ont commencé un processus d'adaptation, visant à l'adaptation de l'industrie interne aux conditions environnementales. Israël a été également inclus dans ce groupe car, même si ce pays ne fait pas partie de l'UE, il possède de nombreuses connexions avec celle-ci, en raison notamment des similitudes au niveau des caractéristiques de ses industries et des engagements pris pour protéger la mer Méditerranée.

Industrie et environnement

Les pays de ce groupe présentent des différences sur leur passé récent. Certains pays de l'est de la Méditerranée, plus concrètement l'Albanie, la Bosnie-et-Herzégovine, la Croatie et la Slovénie, traversent actuellement des phases de transformation économique en raison des réformes prises après la chute du communisme et de la libéralisation progressive du marché. La planification centrale a disparu presque complètement de leur politique et ils se sont tous impliqués dans des programmes indépendants de libéralisation, de stabilisation macro-économique, de réformes légales et institutionnelles et de privatisation. Depuis 1990, ils ont œuvré pour convertir leurs économies au capitalisme et pour ouvrir des voies à l'investissement étranger. L'industrie constitue un composant important de l'économie de ces pays, alors que le secteur tertiaire devient de plus en plus important dans certains d'entre eux.

Cadre politique et légale

Les pays de ce groupe ont réalisé un progrès notable concernant l'approbation de nouvelles législations environnementales. Cependant, jusqu'à aujourd'hui, ce processus n'a pas été accompagné d'une implantation effective des lois et des normes anciennes, ni de celles récemment approuvées. Les résultats du respect de ces normes et de l'incitation de l'industrie à adopter des pratiques respectueuses de l'environnement peuvent être qualifiés dans de nombreux cas de médiocres, ou même mauvais.

Pour une grande partie des pays de l'est de la Méditerranée, la législation de l'Union européenne constitue une référence obligatoire. L'UE a eu une grande influence sur beaucoup de ces pays, non seulement en termes de développement économique mais également sur la gestion de l'environnement ; elle a motivé un mouvement précoce vers l'harmonisation avec les réglementations européennes afin d'accélérer l'adhésion à l'UE.

Dans la plupart de ces pays, l'octroi de permis pour les activités de production est une fonction partagée par différents organismes et agences gouvernementales, ce qui donne souvent un grand manque de coordination. Ainsi, certains d'entre eux travaillent sur cette question en appliquant le système IPPC qui établit une approche intégrée dans l'octroi de permis. La Slovénie, Chypre et Malte se trouvent dans une phase plus avancée.

Dans le cadre international pour la protection de l'environnement à travers la prévention de la pollution, tous les pays de l'est de la Méditerranée ont souscrit, signé ou ratifié la Convention de Bâle sur les déchets dangereux et la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants. En ce qui concerne la réduction de la couche d'ozone, ils ont également tous ratifiés le protocole de Montréal et, à l'exception de l'Albanie, ses premiers amendements. Quant aux changements climatiques, la plupart des pays (Albanie, Chypre, Slovénie, Israël, Malte et Turquie) ont signé ou ratifié le protocole de Kyoto.

Dans le cadre du plan d'action pour la Méditerranée, et par rapport au protocole visant les activités situées à terre, tous les pays ont ratifié le protocole pour la protection de la mer Méditerranée contre la pollution causée par des sources et des activités situées à terre, même si seulement certains d'entre eux ont accepté les amendements de 1995.

En ce qui concerne le protocole des déchets dangereux, seules l'Albanie, Malte et la Turquie l'ont ratifié.

2.3.1. ALBANIE

Introduction

L'Albanie est un pays de l'est de l'Europe, situé dans la région méditerranéenne. Sa superficie totale est de 28 748 km² et sa population est d'environ 3,5 millions d'habitants.

Tableau 2.3.1. Indicateurs de la situation socio-économique en Albanie.

Superficie	10 ³ km ²	28,74
Population	millions	3,56
Espérance de vie	ans	77,24
Énergie par habitant	équival. kg de pétrole	522
PIB actuel	10 ⁹ \$	17,46
Croissance du PIB	%	5,6
PPA du PIB par habitant	\$	4 900

Source : Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)
(PPA = parité de pouvoir d'achat)

La conversion de l'Albanie d'une économie centralisée vers une économie de marché a commencé début 1992, après une chute du PIB de plus de 50 % par rapport à sa valeur maximale enregistrée en 1989. Le gouvernement élu démocratiquement a lancé un programme ambitieux de réforme économique et a placé le pays sur le chemin de l'économie de marché. Parmi les réformes, figurent la privatisation et la réforme du secteur des entreprises et des finances.

Industrie et environnement

L'Albanie est un pays possédant un niveau de revenu qualifié de faible à moyen, en comparaison avec celui des autres pays de la zone. La disponibilité limitée des ressources restreint l'investissement destiné à protéger l'environnement. Cependant, étant donné que la contribution de la production industrielle au PIB a diminué depuis 1990, l'impact de l'activité industrielle sur

l'environnement s'est également vu considérablement réduit grâce à l'élimination de nombreuses sources dangereuses de pollution environnementale.

En dehors de l'agriculture, qui représente presque la moitié du total de la population active, le tissu industriel actuel se compose des activités suivantes : industrie de l'extraction et de l'enrichissement du cuivre, industrie minière du minerai de chrome, extraction et raffinage du pétrole, matériaux de construction et production électrique. Les principaux déchets industriels sont générés dans ces secteurs industriels.

La plupart des industries publiques ont été fermées et le principal problème environnemental est causé par les déchets accumulés dans les anciennes usines industrielles.

Industrie du secteur du ciment

La consommation de ciment en Albanie devrait augmenter rapidement en raison de la construction de nouvelles habitations et infrastructures, mais les problèmes politiques locaux retardent l'économie et cette croissance est moins importante que prévu. La demande est passée de 1,65 Mt en 2002 à 1,76 Mt en 2003.

L'Albanie ne dispose pas d'une capacité importante de production de ciment, elle possède 5 usines ayant une capacité totale de 1,6 Mt. Dans la pratique, seulement 2 usines fonctionnent, ce qui limite la capacité totale à une valeur de 0,2 Mt.

Le bureau albanais de statistiques a signalé que 1,33 Mt de ciment a été importé en 2001, pour la plupart de Grèce et de Croatie.

Tableau 2.3.2. Données principales de l'industrie du ciment en Albanie. Année 2004.

Production (kt/an)	200
Consommation de ciment (kt/an)	1 850
Nombre d'usines intégrées	5
Effectifs approximatifs	n.d.
Capacité de production des fours à clinker kt/an (*)	1 600
Capacité de production en ciment kt/an	1 600

Source : *Global Cement Report 2005*

(*) Année 2002. *World Cement Directory*

Tableau 2.3.3. Types de four utilisés.

Nombre de fours à voie sèche	0
Nombre de fours à voie humide	0
Nombre de fours à voie semi-humide	2
Nombre de fours à voie semi-sèche	0
Nombre de fours verticaux	0
Total fours	2

Source : *World Cement Directory 2002*

2.3.2. BOSNIE-ET-HERZÉGOVINE

Introduction

La Bosnie-et-Herzégovine est un pays de l'est de l'Europe situé au bord de la mer Méditerranée. Sa superficie totale est de 51 129 km² et sa population est d'environ 4,02 millions d'habitants.

Tableau 2.3.4. Indicateurs de la situation socio-économique en Bosnie-et-Herzégovine.

Superficie	10 ³ km ²	51,1
Population	millions	4,02
Espérance de vie	ans	72,85
Énergie par habitant	équiv. kg de pétrole	1 096
PIB actuel	10 ⁹ \$	26,21
Croissance du PIB	%	5
PPA du PIB par habitant	\$	6 500

Source : Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)
(PPA = parité de pouvoir d'achat)

L'économie de la Bosnie-et-Herzégovine supporte encore le fléau de la planification centralisée. L'industrie possède trop de personnel, ce qui reflète la rigueur de l'économie planifiée. Trois ans de guerre ont détruit l'économie et les infrastructures. Néanmoins, le progrès a été considérable depuis que la paix s'est installée dans le pays. L'inflation est restée faible grâce au régime strict de caisse de conversion. Malgré tout, la croissance reste inégale. La préoccupation la plus immédiate est de revitaliser l'économie. Pour cela, la situation générale doit se diriger vers le secteur privé et l'économie de marché.

Une des principales priorités pour protéger la zone méditerranéenne de la Bosnie-et-Herzégovine est la construction d'une infrastructure d'assainissement. Étant donné que la région ne possède pas un réseau d'assainissement complètement développé, certains villages et certaines industries rejettent les eaux résiduaires directement dans des fosses septiques mal structurées qui présentent souvent des fuites et polluent les eaux souterraines.

Industrie et environnement

La pollution du bassin fluvial adriatique de Bosnie-et-Herzégovine, d'une superficie totale de 12 410 km² provient aussi bien de points d'émission que de sources diffuses situées principalement dans les zones karstiques qui, en raison de leur vulnérabilité, laissent pénétrer rapidement les polluants dans le sous-sol.

L'industrie à grande échelle est composée principalement d'entreprises consacrées à l'industrie : agroalimentaire, aluminium, traitement de surfaces, bois, matériaux de construction, textile et électricité (hydroélectrique et thermoélectrique). En raison de la situation créée par la guerre, la plupart des industries à grande échelle qui existaient auparavant fonctionnent avec un rendement très faible qui n'atteint souvent pas les 10 % de la capacité normale habituelle d'avant la guerre. De plus, les systèmes de traitement dont elles disposent sont hors d'usage.

Le problème principal est l'inexistence d'usines de traitement des eaux résiduaires industrielles et municipales, les effluents étant déversés directement.

Industrie du secteur du ciment

La demande en ciment en Bosnie-et-Herzégovine a atteint un pic de 1,7 Mt en 2002 mais elle a diminué en 2003 d'environ 8 %. La consommation par habitant de ciment se stabilise depuis quelques années à environ 400 kg.

Le pourcentage élevé de ciment en sac, environ 70 % en 2003, commence à diminuer.

La capacité de production totale en Bosnie-et-Herzégovine s'élève à 1,05 Mt, répartie sur deux usines de ciment propriétés de HeidelbergCement et Asamer & Hufnagl.

Les exportations de ciment ou de clinker sont inexistantes, étant donné que la capacité totale est insuffisante pour la demande de ciment du pays.

La Croatie réalise ses exportations essentiellement vers la Bosnie-et-Herzégovine, puis vers la Hongrie, alors que le ciment blanc est fourni par l'Italie et la Slovaquie.

Bosnie - Tableau 2.3.5. Données principales de l'industrie du ciment en Bosnie-et-Herzégovine. Année 2004.

Production (kt/an)	920
Consommation de ciment (kt/an)	1 620
Nombre d'usines intégrées	2
Effectifs approximatifs	292
Capacité de production des fours à clinker kt/an (*)	690
Capacité de production en ciment kt/an	1 050

Source : *Global Cement Report 2005*

(*) Année 2002. *World Cement Directory*

Tableau 2.3.6. Types de four utilisés.

Nombre de fours à voie sèche	2
Nombre de fours à voie humide	0
Nombre de fours à voie semi-humide	0
Nombre de fours à voie semi-sèche	0
Nombre de fours verticaux	0
Total fours	2

Source : *World Cement Directory 2002*

2.3.3. CHYPRE

Introduction

Chypre est une île européenne située au nord-est du bassin méditerranéen. Sa superficie totale est de 9 250 km² et sa population est d'environ 780 000 habitants.

Tableau 2.3.7. Indicateurs de la situation socio-économique de Chypre.

Superficie	10 ³ km ²	9,25
Population	milles	780,1
Espérance de vie	ans	77,65
Énergie par habitant	équiv. kg de pétrole	3 203
PIB actuel	10 ⁹ \$	15,71
Croissance du PIB	%	2,6 (nord de Chypre)
PPA du PIB par habitant	\$	20 300

Source : Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)
(PPA = parité de pouvoir d'achat)

Chypre dispose d'un marché ouvert libre et d'une économie basée sur les services et, en partie, sur l'industrie légère. Le peuple chypriote est un des plus prospères de la Méditerranée. Au cours des vingt dernières années, l'économie a délaissé l'agriculture pour passer à l'industrie légère et aux services. Le secteur tertiaire, qui comprend le tourisme, représente près de 70 % du PIB et emploie 62 % de la main d'œuvre totale.

Le secteur commercial est vital pour le pays, puisque l'île n'est pas autosuffisante du point de vue de l'alimentation et qu'elle dispose de peu de ressources naturelles. Chypre doit importer du combustible, la plupart des matières premières, la machinerie lourde et les équipements de transport.

Industrie et environnement

Les bases de l'économie chypriote sont le tourisme et le secteur tertiaire, qui comprend les télécommunications, l'industrie maritime et la banque.

La concentration de population dans les zones côtières, provoquée par l'activité touristique, les services et l'émigration importante provenant de zones urbaines, a exercé avec le temps une grande pression sur l'environnement littoral, en particulier en haute saison. Les activités industrielles contribuent elles aussi à cette pression, puisque les principales industries (production d'énergie, de ciment, de vin et raffineries de pétrole) se trouvent toutes sur la côte. Ces activités produisent des signes de pollution locale à petite échelle. Malgré tout, la qualité de l'eau est bonne dans tout le pays grâce à l'existence de lois strictes sur le rejet des eaux résiduelles et grâce à la protection de l'environnement et de l'habitat naturel.

Industrie du secteur du ciment

Les ventes de ciment au sud de Chypre ont atteint un total de 761 400 t la première moitié de l'année 2004, ce qui est supérieur aux 630 900 t au cours de la même période en 2003. Le principal responsable de cette augmentation de la consommation de ciment a été la demande croissante du gouvernement pour les projets de construction de nouvelles infrastructures.

Le plus grand producteur de ciment de Chypre est l'entreprise Vassiliko Cement Works avec une capacité de 1,2 Mta, suivi par Cyprus Cement (CCC) avec une production de 0,4 Mta.

Le secteur du ciment de Chypre est un marché prometteur grâce aux efforts pour améliorer l'économie par le tourisme et la construction de nouvelles infrastructures.

Tableau 2.3.8. Données principales de l'industrie du ciment à Chypre. Année 2004.

Production (kt/an)	1 890
Consommation de ciment (kt/an)	1 570
Nombre d'usines intégrées	2
Effectifs approximatifs	387
Capacité de production des fours à clinker kt/an (*)	1 690
Capacité de production en ciment kt/an (*)	1 730

Source : *Global Cement Report 2005*

(*) Année 2002. *World Cement Directory*

Tableau 2.3.9. Types de four utilisés.

Nombre de fours à voie sèche	2
Nombre de fours à voie humide	0
Nombre de fours à voie semi-humide	0
Nombre de fours à voie semi-sèche	4
Nombre de fours verticaux	0
Total fours	6

Source : *World Cement Directory 2002*

2.3.4. CROATIE

Introduction

La Croatie est un pays de l'est de l'Europe situé au bord de la mer Adriatique. Sa superficie totale est de 56 542 km² et sa population est d'environ 4,49 millions d'habitants.

Tableau 2.3.10. Indicateurs de la situation socio-économique en Croatie.

Superficie	10 ³ km ²	56,5
Population	millions	4,49
Espérance de vie	ans	74,45
Énergie par habitant	équiv. kg de pétrole	1 775
PIB actuel	10 ⁹ \$	50,33
Croissance du PIB	%	3,7
PPA du PIB par habitant	\$	11 200

Source : *Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)*

(PPA = parité de pouvoir d'achat)

La Croatie a connu un processus d'industrialisation et de diversification accéléré après la seconde guerre mondiale. La décentralisation s'est produite en 1965 et elle a permis la croissance de certains secteurs comme par exemple le tourisme. Les bénéfices générés par l'industrie croate ont été employés pour le développement des régions les plus pauvres de l'ancienne Yougoslavie. Cet état de fait, ainsi que les programmes d'austérité et l'hyperinflation des années 80, ont provoqué un grand mécontentement, qui a fini par alimenter le mouvement indépendantiste.

La privatisation sous le nouveau gouvernement croate avait à peine commencé lorsque la guerre d'indépendance croate s'est déclarée (1991 - 1995) et a causé des ravages sur l'infrastructure économique du pays. Après une période de chômage en constante augmentation, des réformes ont été appliquées. Elles sont passées par l'introduction de la taxe à la valeur ajoutée, dont le succès a été important, par la privatisation planifiée des entreprises contrôlées par l'État et par la révision des budgets pour réduire les dépenses et le déficit. La faible inflation et la stabilité monétaire ont représenté les principales réussites économiques.

Industrie et environnement

Les secteurs industriels qui jouent un rôle actif dans l'économie et dans la pollution environnementale du pays sont le secteur énergétique, cimentier, alimentaire, les raffineries de pétrole, la métallurgie, l'industrie chimique, le papier, l'industrie textile et l'agriculture.

Même si l'industrie n'a pas adopté d'accords volontaires, le secteur de la production énergétique, et en particulier les raffineries de pétrole et les centrales thermiques, est celui qui s'est impliqué le plus activement dans la promotion de la production plus propre. La situation est inversée dans les PME car celles-ci respectent moins la législation environnementale que les grandes entreprises, et elles manquent d'information et de formation sur les opportunités de la PP.

La Croatie a terminé la phase de formation principale en PP. Le concept de PP est en cours d'introduction dans l'industrie. Cependant, le pays possède de nombreux points chauds (hot spots) et l'action dans les domaines de la PP doit donc être plus importante.

Industrie du secteur du ciment

La consommation de ciment en Croatie a augmenté fortement ces deux dernières années. L'association de ciments de Croatie indique que le volume a augmenté d'environ 18 %, avec une consommation qui a atteint les 165 kg par habitant, en raison notamment de la mise en place du programme national d'autoroutes.

Grâce à la bonne santé de l'activité du génie civil, l'approvisionnement national de ciment en vrac a augmenté en 2003, il représentait 61 % des approvisionnements locaux alors qu'il était de 54 % l'année précédente. L'approvisionnement national se fait à 85 % par la route, à 10 % environ par train et 5 % par bateau.

La production de ciment a augmenté d'environ 8 % en 2003 pour atteindre les 3,57 Mt, malgré l'arrêt prolongé d'une des usines existantes. La capacité nationale de production de ciment actuelle en Croatie est de 4,4 Mt par an répartie sur 7 usines.

L'utilisation de combustibles alternatifs pour le four a été relativement limitée jusqu'à aujourd'hui, mais cela devrait sûrement changer grâce à de récentes recherches.

La Croatie a toujours été un pays exportateur de ciment même si les niveaux d'exportation en 2003 ont diminué en raison de la situation nationale. La Bosnie-et-Herzégovine est le marché principal pour les exportations croates de ciment.

Avec la fermeture d'une des usines, le volume des importations de ciment et de clinker a augmenté. Les importations se font de Hongrie et de Slovaquie, et le ciment blanc est importé de Slovaquie et de Grèce. Les importations de clinker ont diminué en 2003 mais elles ont atteint les 40 000 t en 2004.

Bosnie - Tableau 3.3.11. Données principales de l'industrie du ciment en Croatie. Année 2004.

Production (kt/an)	3 800
Consommation de ciment (kt/an)	2 730
Nombre d'usines intégrées	7
Effectifs approximatifs	1 811
Capacité de production des fours à clinker kt/an (*)	2 600
Capacité de production en ciment kt/an	4 400

Source : *Global Cement Report 2005*

(*) Année 2002. *World Cement Directory*

Tableau 3.3.12. Types de four utilisés.

Nombre de fours à voie sèche	5
Nombre de fours à voie humide	0
Nombre de fours à voie semi-humide	0
Nombre de fours à voie semi-sèche	0
Nombre de fours verticaux	0
Total fours	5

Source : *World Cement Directory 2002*

2.3.5. SLOVÉNIE

Introduction

La Slovénie est un pays de l'est de l'Europe situé au bord de la mer Adriatique. Sa superficie totale est de 20 273 km² et sa population est d'environ 2 millions d'habitants.

Tableau 2.3.13. Indicateurs de la situation socio-économique en Slovénie.

Superficie	10 ³ km ²	20,27
Population	millions	2,01
Espérance de vie	ans	76,14
Énergie par habitant	équival. kg de pétrole	3 288
PIB actuel	10 ⁹ \$	39,41
Croissance du PIB	%	3,9
PPA du PIB par habitant	\$	19 600

Source : *Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)*

(PPA = parité de pouvoir d'achat)

La Slovénie a obtenu l'indépendance de l'ancienne Yougoslavie en 1990. Depuis lors, le gouvernement a mis en place un vaste programme de réformes, qui comprend la libéralisation des prix et la restructuration de l'industrie et de l'économie en général. Le processus de privatisation a été réalisé conformément aux prévisions. En 1995, 215 grandes entreprises avaient déjà été privatisées et 478 l'ont été par la suite. À cette époque, la plupart des PME avaient déjà été privatisées (56 000), ce qui correspondait à plus de 90 000 employés.

À l'heure actuelle, c'est l'un des pays les plus prospères de l'Europe en transition et il est en bonne voie pour se joindre aux principales économies industrielles modernes. Les entreprises slovènes sont orientées par tradition vers une économie de marché et elles sont soutenues par une gestion économique relativement bonne. Malgré cela, l'économie slovène dépend beaucoup du commerce extérieur, dont les deux tiers se fait avec d'autres pays de l'Union européenne, ce qui a constitué le motif essentiel de sa demande d'adhésion à l'UE. La Slovénie est donc très sensible à tout changement se produisant dans les relations commerciales avec ses principaux partenaires.

Industrie et environnement

La Slovénie est une petite économie et ses entreprises sont principalement des PME. Elle possède autour de 141 000 entreprises. Environ 1,3 % du total correspondent à des entreprises de plus de 1 000 employés, alors que 89,7 % sont des micro-entreprises ou des petites et moyennes entreprises (PME), avec un nombre de travailleurs inférieur à 100. Il est évident que ces PME constituent la plus grande partie de l'économie nationale mais il est vrai qu'elles ne disposent pas des ressources nécessaires pour investir dans la recherche et le développement et qu'elles se concentrent principalement dans les noyaux urbains. Les PME reçoivent une assistance technique et une assistance de gestion de la part d'institutions telles que la chambre de commerce et d'industrie, le centre de développement des petites entreprises et certains parcs technologiques de Maribor, Ljubljana.

Parmi les 141 000 entreprises slovènes, 80 % sont privées. Les secteurs industriels les plus développés sont la chimie, la pharmacie, le papier, le textile, l'alimentation et les boissons, l'ébénisterie, les appareils électroménagers, l'automobile et la transformation des métaux.

L'industrie est sans aucun doute un des principaux pollueurs de la Slovénie. La plupart de la pollution atmosphérique provient de la transformation du métal, de la production d'électricité, de l'industrie papetière, des industries des arts graphiques et de la fabrication de meubles (poussières, SO₂, NO_x, COT), de l'industrie chimique, (CO, SO₂, NH₃) et de celle du bois (COT). La pollution de l'eau est l'un des principaux problèmes environnementaux. Les principaux polluants sont les matières non solubles (provenant de l'industrie papetière, des arts graphiques, de la production d'énergie, de l'industrie alimentaire et de la transformation des métaux), les problèmes de DCO (générée par l'industrie papetière, par l'industrie des arts graphiques et par l'industrie alimentaire), les nitrates et les nitrites (provenant de l'industrie de transformation du métal), l'azote ammoniacal (provenant du tannage et de l'industrie chimique) et les métaux (provenant de l'industrie de la transformation du métal et de l'industrie chimique). La production de déchets solides présente une légère baisse.

Industrie du secteur du ciment

La consommation de ciment en Slovénie a augmenté fortement en 2003 en raison de l'augmentation des constructions de bâtiments et d'habitations. Avec une augmentation de 16,4 % de la consommation de ciment par rapport à l'année précédente, ayant permis d'atteindre 1,35 Mt, la position de la Slovénie est renforcée comme le pays de l'est de l'Europe ayant la plus forte consommation de ciment par habitant, soit 600 kg/hab.

La consommation de ciment est produite à 80 % en vrac. Un pourcentage similaire de ciment est fourni par route.

La Slovénie présente deux usines de production de ciment avec une capacité totale de 1,5 Mt/an et elles sont aux mains des plus grands producteurs de ciment autrichiens.

L'utilisation de combustibles alternatifs est assez développée ; graisses animales, pneus usés et huiles usées sont les plus souvent utilisés.

En 2003, les exportations de ciment ont atteint 0,17 Mt, avec un peu plus de 58 % destinés à l'Italie. En ce qui concerne le clinker, les exportations sont assez faibles, avec une valeur située aux alentours de 8 000 t, toutes destinées à l'Italie.

Les importations de ciment ont augmenté de 35,5 % en 2003 pour atteindre 206 000 t, ce qui représente 15 % de la demande locale. L'Italie est la première source d'importation, elle a fourni 108 000 t de ciment Portland et 5000 t de ciment blanc en 2003.

Tableau 2.3.14. Données principales de l'industrie du ciment en Slovénie. Année 2004.

Production (kt/an)	1 260
Consommation de ciment (kt/an)	1 230
Nombre d'usines	2
Effectifs approximatifs	387
Capacité de production des fours à clinker kt/an (*)	800
Capacité de production en ciment kt/an	1 500

Source : *Global Cement Report 2005*

(*) Année 2002. *World Cement Directory*

Tableau 2.3.15. Types de four utilisés.

Nombre de fours à voie sèche	3
Nombre de fours à voie humide	0
Nombre de fours à voie semi-humide	0
Nombre de fours à voie semi-sèche	0
Nombre de fours verticaux	0
Total fours	3

Source : *World Cement Directory 2002*

2.3.6. ISRAËL

Introduction

Israël possède une économie diversifiée et avancée sur le plan technologique, avec un secteur public important, même s'il est en recul, et un puissant secteur de technologie de dernière génération. Les principaux secteurs industriels sont l'électronique de haute technologie et l'équipement biomédical, les produits du métal, les produits alimentaires préparés, l'industrie chimique et les équipements pour le transport. De plus, Israël possède un important secteur tertiaire ; Israël est le leader mondial en développement de logiciels

Tableau 3.3.16. Indicateurs de la situation socio-économique en Israël.

Superficie	10 ³ km ²	20,77
Population	millions	6,27
Espérance de vie	ans	79,32
Énergie par habitant	équiv. kg de pétrole	3 123
PIB actuel	10 ⁹ \$	129
Croissance du PIB	%	3,9
PPA du PIB par habitant	\$	20 800

Source : *Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)*

(PPA = parité de pouvoir d'achat)

Israël présente un ensemble cohérent de réglementations et de politiques environnementales. La PP est intégrée dans la législation sur les substances toxiques et dangereuses et elle est contrôlée par un système de permis. L'application d'activités préventives est soutenue directement par le centre israélien pour la production plus propre et par les organismes gouvernementaux ou à travers ceux-ci.

Industrie et environnement

Au cours des deux dernières décennies, des progrès importants ont eu lieu au niveau industriel dans les domaines suivants : l'électronique médicale, l'agronomie, les télécommunications, les produits de chimie fine, les logiciels, le matériel informatique ainsi que la taille et le polissage de diamants.

Les secteurs de la haute technologie, dans lesquels des capitaux et des efforts de formation ont été investis et qui demandent des techniques de production sophistiquées ainsi qu'un investissement considérable dans la recherche et le développement, sont ceux qui enregistrent le taux de croissance le plus élevé. Plus de 90 % du budget national annuel en recherche et développement est destiné aux industries de technologie de pointe.

Industrie du secteur du ciment

La consommation actuelle de ciment par habitant en Israël est de 570 kg. Cette valeur est faible pour le pays mais pas à l'échelle mondiale. Pour 50 %, la demande provient de la construction d'habitations et pour 33 % de la construction d'infrastructures.

Israël dispose de 3 usines de production de ciment avec une capacité de 4,70 Mta de clinker et 6,2 Mta de ciment. Il n'est pas prévu d'augmenter cette capacité. Nesher Cement est l'unique producteur de ciment en Israël.

Israël est un marché actif aussi bien exportateur qu'importateur. Cependant, toutes les exportations se font généralement vers le marché national palestinien où il existe une compétitivité potentielle avec la Jordanie et d'autres pays voisins ayant des activités d'exportation très actives sur le pourtour du Moyen-Orient. Les exportations vers la Palestine ont atteint une valeur maximale de 1,6 Mt par an mais ces dernières années elles ont diminué jusqu'à 0,85 Mt en 2003 même si elles montrent des signes de récupération avec 0,95 Mt en 2004.

Les importations de ciment en Israël proviennent traditionnellement de Roumanie, de Turquie, de Jordanie et de Chypre et elles sont basées sur des accords passés avec le gouvernement israélien.

Tableau 2.3.17. Données principales de l'industrie du ciment en Israël. Année 2004.

Production (kt/an)	4 630
Consommation de ciment (kt/an)	3 820
Nombre d'usines	3
Effectifs approximatifs	636
Capacité de production des fours à clinker kt/an	4 700
Capacité de production en ciment kt/an	6 200

Source : *Global Cement Report 2005*

Tableau 2.3.18. Types de fours utilisés.

Nombre de fours à voie sèche	2
Nombre de fours à voie humide	6
Nombre de fours à voie semi-humide	0
Nombre de fours à voie semi-sèche	1
Nombre de fours verticaux	0
Total fours	9

Source : World Cement Directory 2002

2.3.7. MALTE

Introduction

Malte a basé son développement économique sur le développement du tourisme et des exportations de produits manufacturés car elle a peu de matières premières et un marché national très limité. Depuis le milieu des années 80, l'expansion de ces activités est devenue un des principaux moteurs de la forte croissance de l'économie maltaise.

Tableau 2.3.19. Indicateurs de la situation socio-économique à Malte.

Superficie	km ²	316
Population	milles	398,5
Espérance de vie	ans	78,86
Énergie par habitant	équiv. kg de pétrole	2 089
PIB actuel	10 ⁹ \$	7,22
Croissance du PIB	%	1
PPA du PIB par habitant	\$	18 200

Source : Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)
(PPA = parité de pouvoir d'achat)

Il existe une solide base pour la fabrication de produits de grande valeur ajoutée tels que les appareils électroniques et les produits pharmaceutiques, alors que le secteur manufacturier compte plus de 250 entreprises étrangères, orientées vers l'exportation. Le tourisme génère 35 % du PIB.

Industrie et environnement

La contribution du secteur manufacturier au PIB est de 26 % et sa consommation totale en énergie avoisine les 27 %. Les principaux types d'industries qui composent le secteur vont de la fabrication de semi-conducteurs et d'autres pièces d'équipement sophistiquées à l'élaboration d'aliments et de boissons ou la réparation de bateaux. Le tourisme et la construction sont d'autres activités importantes du pays.

Près de 90 % des entreprises sont des PME qui reçoivent une assistance technique et une aide à la gestion de la part de l'Institut pour le développement des petites entreprises (IPSE). La relation des PME avec la technologie et les possibilités de PP est pratiquement nulle et le soutien qu'elles reçoivent des grandes industries pour la mise en place de la PP est très rare.

Industrie du secteur du ciment

Malte est un pays dont la demande de ciment blanc est très élevée : elle représentait 35 % de la demande totale de l'année dernière. La consommation de ciment par habitant est d'environ 675 kg. La variation de consommation annuelle pour les huit dernières années jusqu'en 2002 a été de 0,25 Mt à 0,28 Mt.

Tout le ciment nécessaire dans le pays est importé. Des plans de construction d'une usine de production de ciment ont été réalisés il y a cinq ans mais elle a été interdite pour des raisons environnementales. Deux terminaux de ciment ont été installés ces dernières années, ce qui a permis de fournir du ciment en sac et en vrac. L'Italie est le principal fournisseur de ciment avec 95 % du volume importé ; les producteurs italiens ont consolidé leur position sur le marché maltais en atteignant 0,23 Mt en 2003.

Tableau 2.3.20. Données principales de l'industrie du ciment à Malte. Année 2004.

Production (kt/an)	0
Consommation de ciment (kt/an)	250
Nombre d'usines	0
Effectifs approximatifs	0
Capacité de production des fours à clinker kt/an	0
Capacité de production en ciment kt/an	0

Source : Global Cement Report 2005

Tableau 2.3.21. Types de four utilisés.

Nombre de fours à voie sèche	0
Nombre de fours à voie humide	0
Nombre de fours à voie semi-humide	0
Nombre de fours à voie semi-sèche	0
Nombre de fours verticaux	0
Total fours	0

Source : World Cement Directory 2002

2.3.8. SERBIE et MONTÉNÉGRO

Introduction

Depuis le 3 juin 2006, la Serbie et le Monténégro sont deux républiques indépendantes qui, auparavant, formaient une fédération. Dans la présente étude, les données disponibles sont celles de l'ancienne fédération.

Tableau 2.3.22. Indicateurs de la situation socio-économique en Serbie et Monténégro.

Superficie	10 ³ km ²	102,35
Population	millions	10,83
Espérance de vie	ans	74,73
Énergie par habitant	équiv. kg de pétrole	n.d
PIB actuel	10 ⁹ \$	26,27
Croissance du PIB	%	6,5
PPA du PIB par habitant	\$	2 400

*Source : Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)
(PPA = parité de pouvoir d'achat)*

Industrie et environnement

En raison des sanctions économiques et politiques imposées en 1992, l'utilisation des ressources naturelles a été intensifiée au cours des dix dernières années. La pollution de l'eau et de l'air, ainsi que la génération de déchets industriels, ont atteint des niveaux préoccupants.

Au cours des 30 dernières années, la qualité des eaux a chuté considérablement suite à l'industrialisation rapide et aux pressions de l'urbanisation. Environ 20 000 km² du territoire de Serbie et Monténégro peuvent être classés comme zone dégradée par l'érosion, les carrières ou le dépôt non contrôlé de déchets.

Les minerais sont la première ressource naturelle de Serbie et Monténégro, et les principales industries du pays sont des industries d'extraction. Les réserves d'antimoine et de plomb sont parmi les plus importantes d'Europe. On trouve également du charbon, du zinc, de l'or, du chrome et du cuivre et il existe de petites réserves de gaz naturel.

Industrie du secteur du ciment

La diminution de l'activité de construction du pays a fait baisser la consommation nationale de ciment de 5,8 % pour descendre à 2,3 Mt. La construction d'habitations est le principal marché du secteur et elle représente 60 % de la consommation totale. Les deux tiers de la consommation de ciment en Serbie et Monténégro sont du ciment en sac mais l'utilisation de ciment en vrac est importante dans la zone de Belgrade.

La Serbie et Monténégro possède 4 usines de production de ciment, ce qui représente une capacité totale de 3,7 Mt ; toutes ses usines se trouvent en Serbie à l'exception d'une seule dans la province du Kosovo.

Les importations de ciment sont pratiquement nulles. Les exportations sont faibles, en 2003 elles étaient de 0,15 Mt, et elles sont normalement destinées aux marchés de pays voisins.

Tableau 2.3.23. Données principales de l'industrie du ciment en Serbie et Monténégro. Année 2004.

Production (kt/an)	2 450
Consommation de ciment (kt/an)	2 400
Nombre d'usines	4
Effectifs approximatifs	n.d
Capacité de production des fours à clinker kt/an (*)	2 700
Capacité de production en ciment kt/an	3 700

Source : *Global Cement Report 2005*
 (*) Année 2002. *World Cement Directory*

Tableau 2.3.24. Types de four utilisés.

Nombre de fours à voie sèche	6
Nombre de fours à voie humide	2
Nombre de fours à voie semi-humide	0
Nombre de fours à voie semi-sèche	0
Nombre de fours verticaux	0
Total fours	8

Source : *World Cement Directory 2002*

2.3.9. TURQUIE

Introduction

La Turquie est un pays situé entre les continents européen et asiatique, au bord de la mer Méditerranée. Sa superficie totale est de 780 580 km² et sa population est d'environ 70 millions d'habitants.

Tableau 2.3.25. Indicateurs de la situation socio-économique en Turquie.

Superficie	10 ³ km ²	780,6
Population	millions	69,66
Espérance de vie	ans	72,36
Énergie par habitant	équiv. kg de pétrole	1.1815
PIB actuel	10 ⁹ \$	508,7
Croissance du PIB	%	8,2
PPA du PIB par habitant	\$	7 400

Source : *Groupe de la Banque mondiale et globalEDGE (2004)*
 (PPA = parité de pouvoir d'achat)

La stratégie de croissance, basée sur les exportations et le libre marché, a situé l'économie turque parmi les économies de croissance les plus rapides au sein de l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE). Cependant, le programme de réformes commencé au début des années 80 n'a pas été totalement terminé, ce qui a provoqué une inflation élevée, stimulée principalement par le grand déficit du secteur public.

La baisse d'importance de l'agriculture dans l'économie coïncide avec l'expansion rapide du secteur tertiaire et de l'industrie. Le secteur textile représente la principale industrie manufacturière turque et c'est elle qui exporte le plus. Avec la création d'un Ministère de l'environnement en 1991, les questions environnementales prennent de plus en plus d'importance.

Industrie et environnement

Les principaux secteurs industriels turcs sont les industries manufacturières (textile, industrie chimique, métallurgique, papetière et alimentaire), l'industrie minière, le secteur énergétique et celui de la construction. D'autres secteurs importants sont ceux des infrastructures touristiques, des véhicules automobiles et de l'électronique. La pollution industrielle de la Turquie est principalement due aux activités de production. Le secteur manufacturier est celui qui contribue le plus à la pollution industrielle du pays.

En Turquie, les petites et moyennes entreprises représentent 98,8 % du total des installations de production ; la plupart des 1,2 % restantes correspond à des entreprises de taille moyenne. La situation géographique des industries est devenue récemment un sujet important en Turquie. Comme le montrent les investissements du gouvernement, il existe actuellement une certaine tendance à encourager le développement des zones industrielles qui existent déjà et à en établir de nouvelles, plutôt que d'encourager la croissance des PME situées dans des zones isolées. À l'heure actuelle, 14 % des PME se trouvent dans des zones industrielles organisées et 38 % dans des petites zones industrielles. Le reste correspond à des entreprises isolées.

Industrie du secteur du ciment

La consommation de ciment en Turquie présente pour la deuxième année consécutive une croissance du volume demandé, atteignant une valeur de 28,11 Mt en 2003, ce qui représente une augmentation nationale de 4,8 %.

En ce qui concerne les types de ciment, le ciment Portland ordinaire représentait 35,1 % du ciment consommé en 2003 alors que le ciment blanc représentait 0,7 %.

La capacité de production de ciment en Turquie est de 38 Mta de clinker et de 67 Mta de ciment, se répartissant sur 57 usines. La production a augmenté de 7,13 % en 2003 pour atteindre 30,42 Mt. La diminution du ratio de production de clinker est principalement due à la réduction de ses exportations. L'utilisation de combustibles alternatifs en est à ses débuts, même si les réglementations sur ce sujet sont en place depuis 2001.

Les exportations de ciment ont augmenté de 23,6 % en 2003, atteignant une valeur de 7,39 Mt, avec 44,29 % du volume à destination de l'Europe. Les exportations de clinker diminuent actuellement ; elles ont baissé de 31,9 % l'année dernière pour descendre à une valeur de 3,04 Mt et elles devraient continuer à baisser cette année jusqu'à 2 Mt. L'Espagne et l'Italie représentent 81 % des exportations de clinker.

Les importations de ciment sont très faibles. Les importations de clinker en 2003 ont été de 12 300 t et la plupart ont été destinées à l'alimentation des broyeurs de la zone d'Istanbul.

Tableau 2.3.26. Données principales de l'industrie du ciment en Turquie. Année 2004.

Production (kt/an)	38 200
Consommation de ciment (kt/an)	29 300
Nombre d'usines	57
Effectifs approximatifs	8 743
Capacité de production des fours à clinker kt/an (*)	38 000
Capacité de production en ciment kt/an	67 000

Source : Global Cement Report 2005

(*) Année 2002. World Cement Directory

Tableau 2.3.27. Types de four utilisés.

Nombre de fours à voie sèche	54
Nombre de fours à voie humide	4
Nombre de fours à voie semi-humide	2
Nombre de fours à voie semi-sèche	3
Nombre de fours verticaux	0
Total fours	63

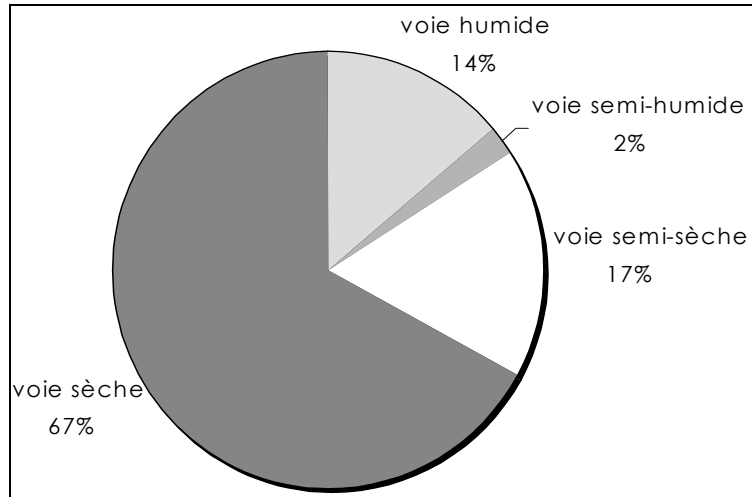
Source : World Cement Directory 2002

2.4. SITUATION DE L'INDUSTRIE DU CIMENT DANS LES PAYS DU PAM

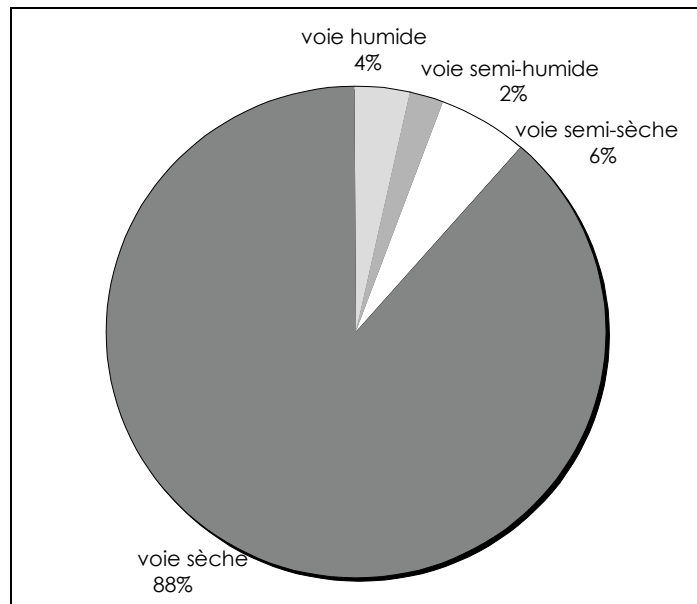
La production de ciment peut être réalisée selon quatre processus différents : la production par voie humide, semi-humide, semi-sèche et sèche. Ces différents processus seront décrits plus en détail au chapitre 3. *Description des processus*. La voie sèche est le processus qui présente la plus grande économie d'énergie, un aspect important à considérer, que ce soit pour l'environnement (moins consommation de combustible, plus faibles émissions dans l'atmosphère) ou pour l'économie (réduction des coûts).

Parmi les pays du PAM, l'Espagne, la Turquie et l'Italie sont ceux qui possèdent le plus grand nombre de fours à voie sèche. Au contraire, l'Égypte et Israël sont ceux qui utilisent le plus grand nombre de fours à voie humide, alors que ce processus est celui qui présente une plus grande consommation énergétique. Ces fours sont les moins recommandés dans la production de ciment, que ce soit pour des raisons environnementales ou économiques, à l'exception des fours verticaux, qui sont pratiquement obsolètes.

Le graphique ci-après indique le pourcentage d'utilisation selon le type de four dans les pays du PAM alors que le graphique suivant montre le pourcentage de la capacité de production installée à l'heure actuelle dans ces pays ; on peut observer sur ce dernier que 88 % de la capacité de production de ciment dans les pays du PAM se fait par voie sèche.



Graphique 2.4.1. Types de fours installés dans les pays du PAM en 2005.



Graphique 2.4.2. Capacité installée selon le type de four dans les pays du PAM en 2005.

La situation économique de ces dernières années a fait de la réduction des coûts un facteur clé dans nos pays, quel que soit le secteur industriel. Dans cet objectif, les fabricants de ciment ont adopté de nombreuses mesures pour réduire la consommation de matières premières et d'énergie, afin d'augmenter l'efficacité et le rendement de leurs processus, ce qui a contribué, de façon indirecte, à l'amélioration environnementale des usines.

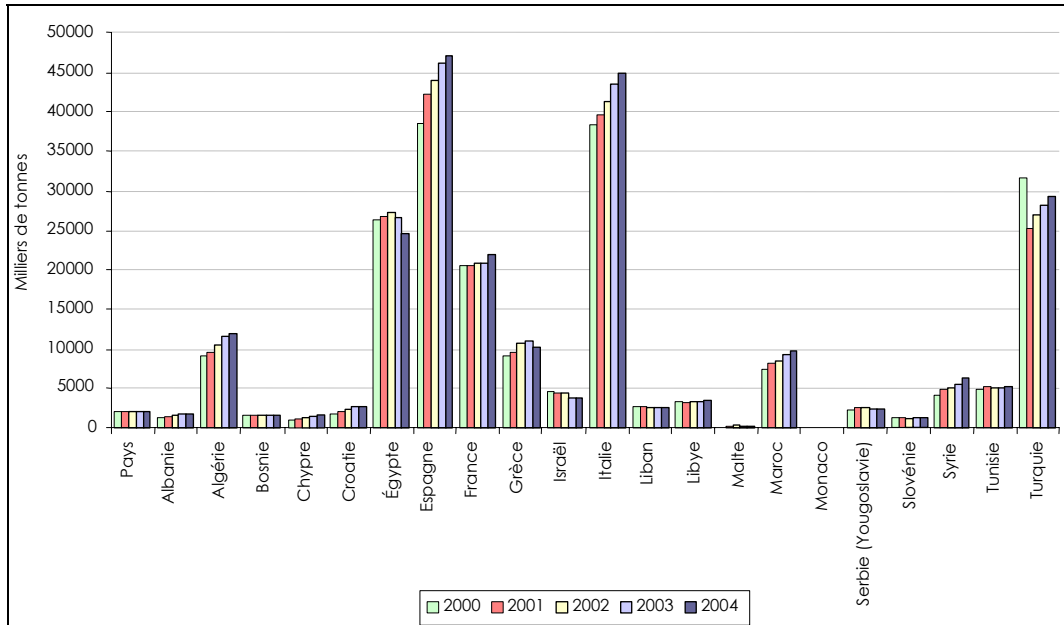
En ce qui concerne la consommation de ciment, l'Espagne, l'Italie, l'Égypte, la Turquie et la France sont les pays du PAM dont la consommation est la plus importante, avec une valeur en 2004 de 47 200, 45 000, 29 300, 24 500 et 21 800 kt respectivement. Les consommations des différents pays de la région du plan d'action pour la Méditerranée sur différentes années sont reprises dans le tableau 2.4.1.

Tableau 2.4.1. Données de consommation de ciment dans les pays du PAM (en milliers de tonnes).

Pays	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Albanie	950	1 200	1 500	1 650	1 760	1 850
Algérie	7 611	9 000	9 500	10 500	11 500	12 000
Bosnie-et-Herzégovine	1 210	1 580	1 600	1 710	1 570	1 620
Croatie	1 830	1 823	1 923	2 280	2 710	2 730
Chypre	920	940	1 050	1 350	1 430	1 570
Égypte	27 200	26 300	26 700	27 200	26 600	24 500
Espagne	34 630	38 440	42 150	44 120	46 220	48 003
France	20 210	20 630	20 660	20 727	20 678	21 800
Grèce	8 500	9 100	9 550	10 640	11 000	10 100
Israël	4 850	4 519	4 376	4 350	3 820	3 820
Italie	36 120	38 338	39 469	41 300	43 500	45 000
Liban	2 966	2 620	2 720	2 500	2 592	2 592
Libye	3 000	3 220	3 000	3 260	3 300	3 500
Malte	570	0	270	280	270	250
Maroc	7 260	7 479	8 057	8 480	9 260	9 700
Monaco	0	0	0	0	0	0
Serbie et Monténégro	1 500	2 248	2 452	2 475	2 330	2 400
Slovénie	1 206	1 240	1 180	1 160	1 350	1 230
Syrie	4 865	4 200	4 800	5 060	5 500	6 400
Tunisie	4 390	4 948	5 178	5 000	5 100	5 300
Turquie	31 529	31 500	25 250	26 811	28 106	29 300

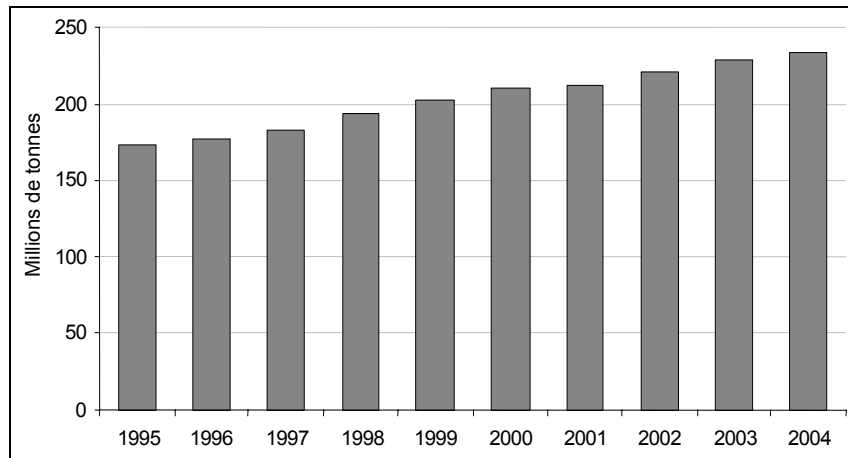
Source : Global Cement Report 2005

Les données du tableau précédent sont reportées dans le graphique 2.4.3. Il convient de souligner que la forte consommation de l'Égypte est la conséquence d'une population élevée, la consommation de ciment par habitant est, elle, relativement faible (410 kg/hab./an). Cette valeur est reprise dans le tableau 2.4.2.



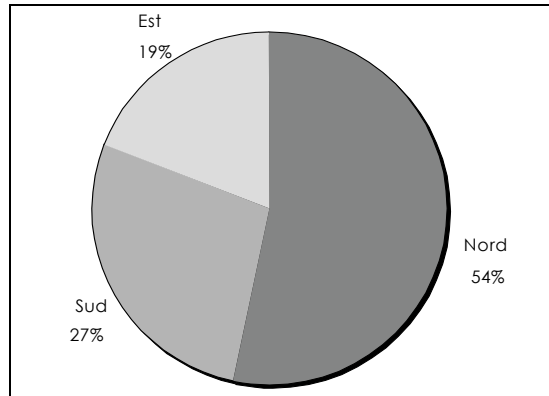
Graphique 2.4.3. Consommation de ciment dans les pays du PAM (en milliers de tonnes).

À partir des données du tableau 2.4.1 on obtient le graphique de la consommation globale de ciment dans la région méditerranéenne (voir graphique 2.4.4). On observe une croissance continue de 1995 à 2004. La consommation totale de ciment en 2004 dans la région méditerranéenne a été de 232,8 millions de tonnes et cette valeur est la plus élevée sur la période considérée.



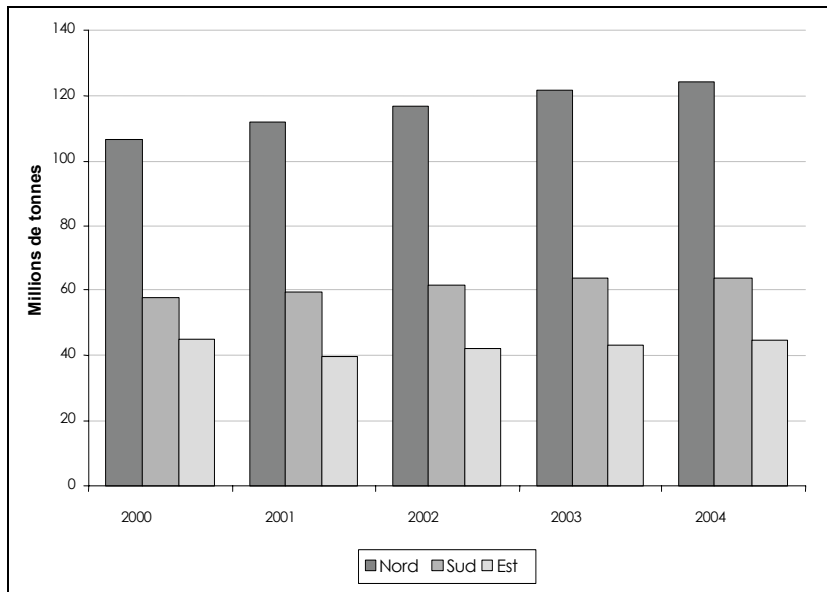
Graphique 2.4.4. Consommation globale de ciment dans les pays du PAM (en millions de tonnes).

Si l'on observe la consommation pour chaque région de la Méditerranée (nord, sud, est), on constate de grandes différences (voir graphique 2.4.5). Ainsi, par exemple, en 2000, 54 % de la consommation totale de ciment dans les pays du plan d'action pour la Méditerranée correspond aux pays du nord de la Méditerranée, alors que ce chiffre est de 27 % et 19 %, respectivement pour les pays du sud et de l'est de la Méditerranée.



Graphique 2.4.5. Consommation de ciment dans les pays du PAM. Année 2004.

Cette situation s'est maintenue au cours du temps et le Nord a toujours été la région des pays du plan d'action pour la Méditerranée avec la plus forte demande, ce qui, de plus, va en augmentant (voir graphique 2.4.6). Le Sud a également toujours occupé la deuxième place, avec lui aussi une consommation en augmentation et l'Est a occupé la dernière place avec une consommation pratiquement constante.



Graphique 2.4.6. Consommation de ciment dans les pays du PAM.

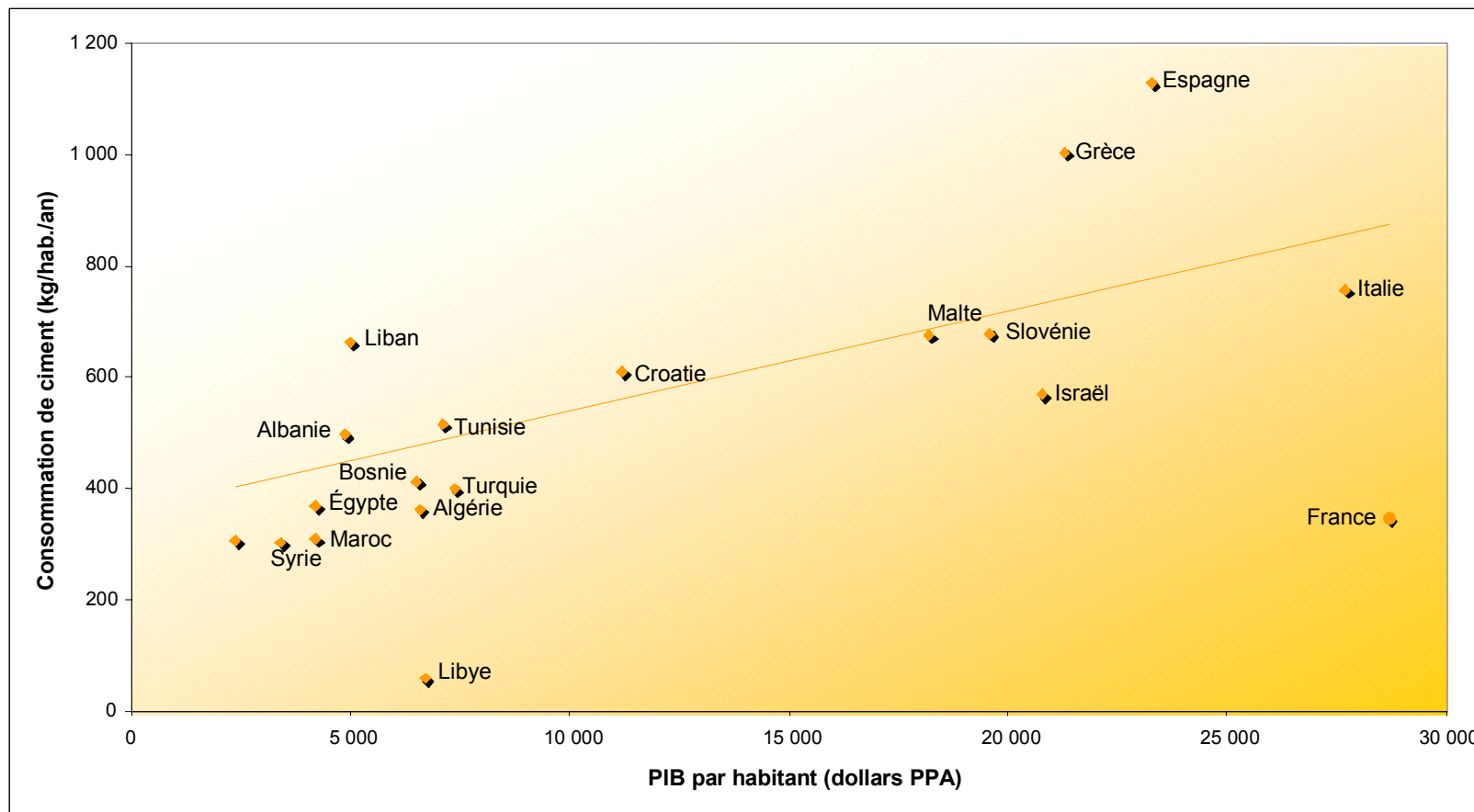
Le tableau 2.4.2 montre la consommation par habitant de chacun des pays du PAM en 2004 :

Tableau 2.4.2. Consommation de ciment par habitant dans les pays du PAM. Année 2004.

Pays	Consommation (kg/hab./an)
Algérie	362
Égypte	369
Liban	663
Libye	60
Maroc	308
Syrie	304
Tunisie	515
Espagne	1 126
France	366
Grèce	963
Italie	785
Monaco	
Albanie	497
Bosnie	412
Croatie	1 588
Slovénie	643
Serbie (Yougoslavie)	678
Israël	307
Malte	570
Turquie	675

Source : *Global Cement Report 2005*

En comparant la consommation de ciment par habitant avec le PIB par habitant de chaque pays sur le graphique 2.4.7, on observe une tendance plus ou moins généralisée, selon laquelle les pays dont le PIB par habitant est plus élevé présentent une plus forte consommation de ciment par habitant. Il convient de souligner deux cas extrêmes, le cas de la France, qui présente une consommation de ciment par habitant très faible par rapport à son PIB. En effet, l'activité de la construction n'est pas très importante dans l'économie française, alors qu'au contraire, le secteur de la construction en Espagne est un des secteurs les plus influents dans l'économie du pays. Comme nous l'avons souligné auparavant, l'Égypte, bien que sa consommation de ciment soit la plus forte (en raison de la population élevée), possède une consommation par habitant relativement faible.



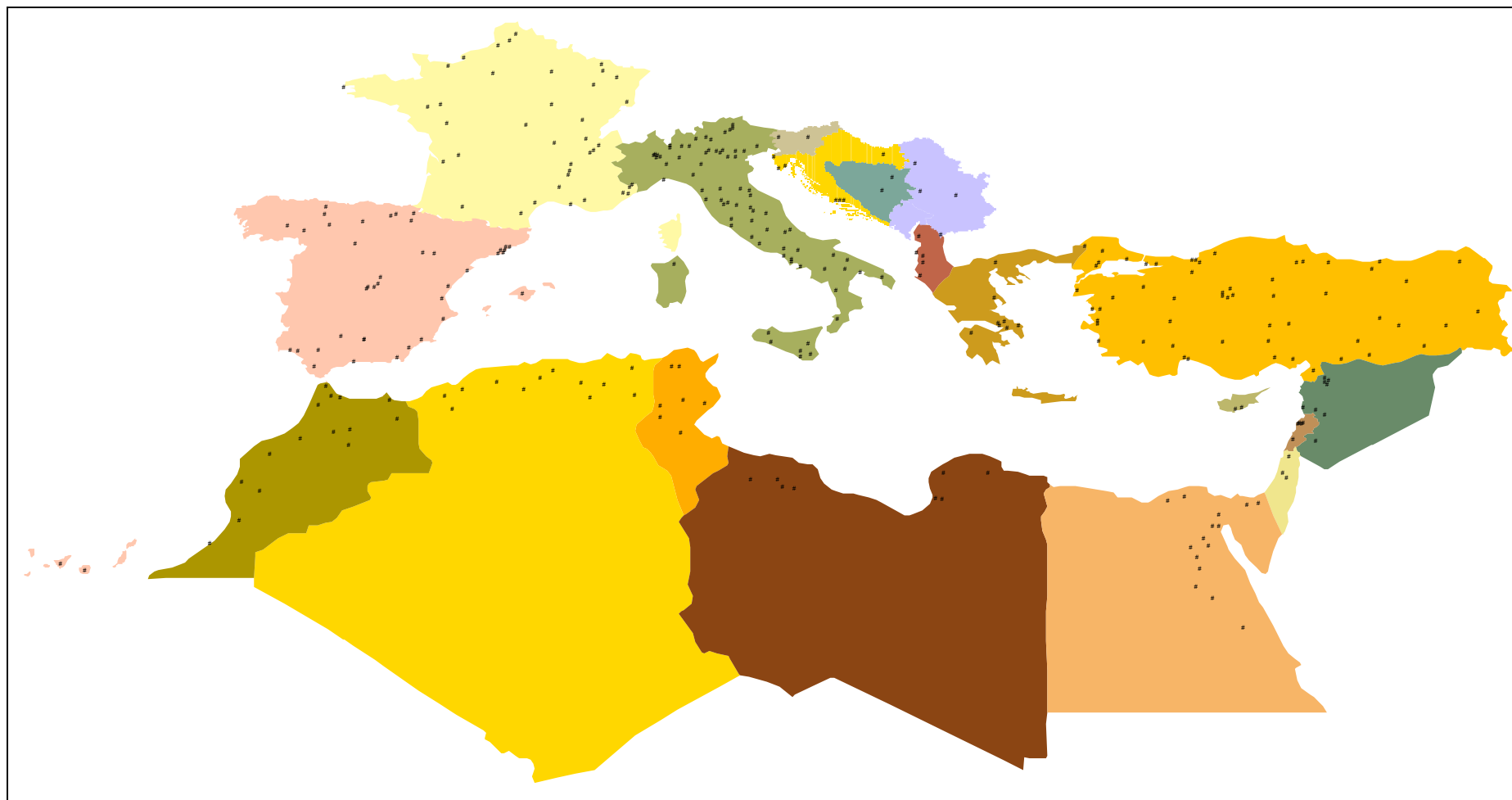
Graphique 2.4.7. Consommation de ciment par rapport au PIB par habitant. Année 2004.

En ce qui concerne la production, tout comme pour la consommation, de grandes différences sont observées entre les différents pays de la Méditerranée, comme le montrent les données du tableau 2.4.3 représentées dans le graphique 2.4.9.

Tableau 2.4.3. Production de ciment dans les pays du PAM (milliers de tonnes)

Pays	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Albanie	300	300	300	300	300	200	200	190	200	200
Algérie	6 820	7 460	7 130	7 800	7 680	8 400	8 600	8 900	9 000	10 500
Bosnie	0	0	0	500	500	630	700	850	800	920
Croatie	1 690	1 795	2 084	2 190	2 600	2 773	3 165	3 300	3 570	3 800
Chypre	1 022	1 500	1 450	2 950	2 950	1 450	1 500	1 790	1 860	1 890
Égypte	16 934	18 700	19 700	20 950	22 030	24 100	25 700	28 500	29 100	31 000
Espagne	28 491	27 791	26 693	33 080	35 830	38 410	40 900	42 420	44 700	46 602
France	19 730	19 420	19 610	18 700	19 530	20 040	20 430	19 437	19 655	20 900
Grèce	13 940	14 500	14 700	14 750	14 350	15 420	15 200	14 680	15 500	15 700
Israël	5 600	5 600	5 400	6 476	6 354	5 703	4 703	4 582	4 607	4 630
Italie	34 000	33 832	34 378	36 100	37 300	39 020	39 804	41 400	43 500	44 800
Liban	2 450	3 780	3 650	3 310	3 200	2 900	2 900	3 200	3 300	4 400
Libye	3 200	0	0	3 000	3 000	3 200	3 000	3 320	3 320	3 500
Malte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maroc	6 405	6 800	7 500	7 414	7 530	7 830	8 397	8 800	8 397	9 900
Monaco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Serbie et Monténégro (Yougoslavie)	0	2 200	2 100	1 800	1 500	2 229	2 512	2 485	2 100	2 450
Slovénie	0	1 064	1 011	1 150	1 223	1 255	1 240	1 180	1 200	1 260
Syrie	4 463	4 471	4 840	4 607	4 781	4 252	5 200	5 010	5 010	5 200
Tunisie	4 960	4 400	4 800	4 750	4 210	5 383	5 464	5 550	5 750	6 000
Turquie	31 500	35 236	36 034	37 488	34 816	35 950	29 960	32 758	35 095	38 200

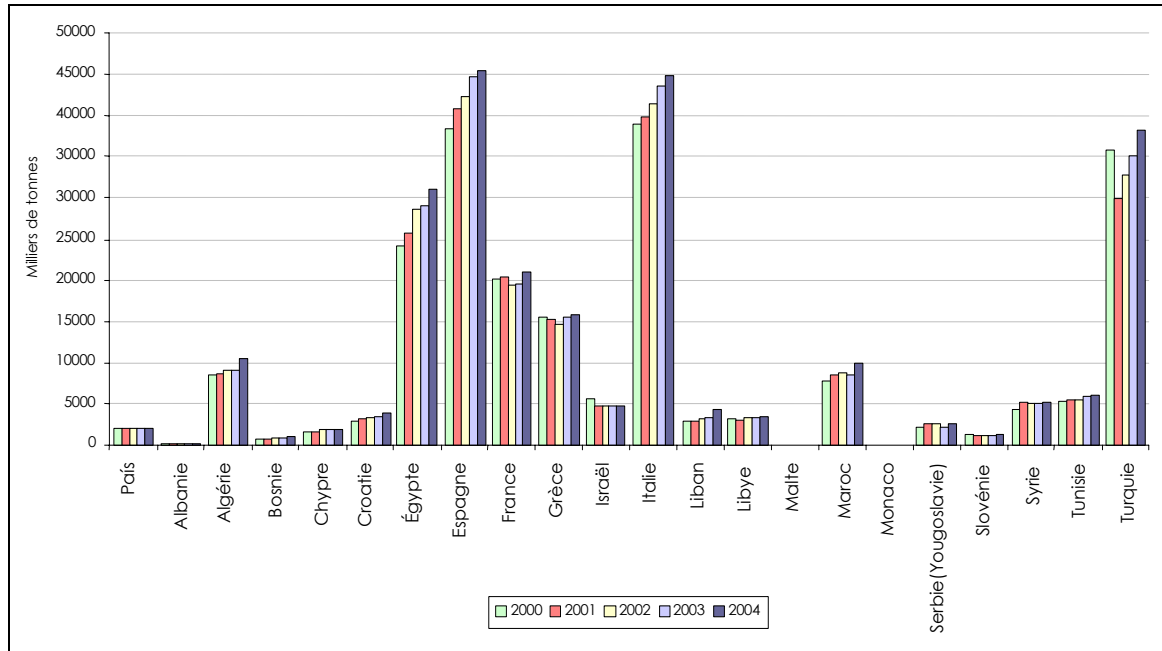
Comme on peut le constater, les plus grands producteurs sont l'Espagne, l'Italie, la Turquie et l'Égypte, et ce sont ces pays qui présentent le plus grand nombre d'usines de ciment, usines intégrées (production de clinker et de ciment) et de broyage uniquement (sans production de clinker), voir graphique 2.4.8.



Source : Global Cement Report 2005

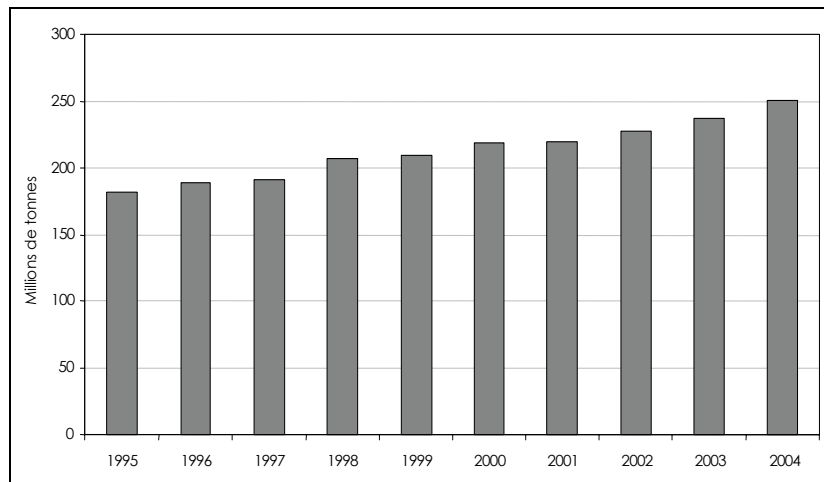
Graphique 2.4.8. Répartition des usines de ciment dans les pays du plan d'action pour la Méditerranée.

À partir des données du tableau 2.4.3 on obtient le graphique suivant sur la production de ciment dans les pays du PAM entre 2000 et 2004.



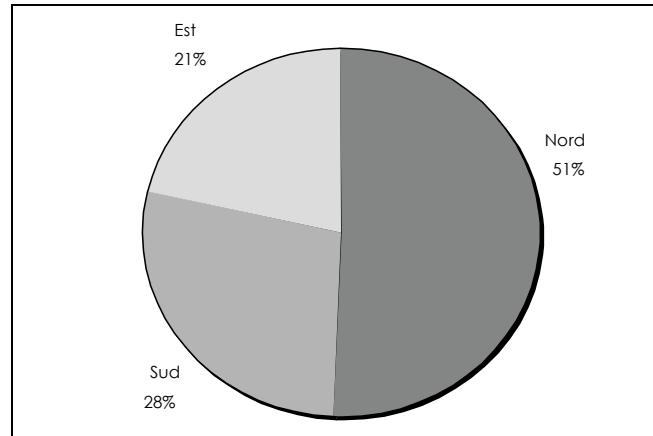
Graphique 2.4.9. Production de ciment dans les pays du PAM (en milliers de tonnes).

Ensuite, à partir du tableau 2.4.3 on obtient la production totale de ciment dans les pays du PAM. Cette production s'est maintenue aux alentours de 200 millions de tonnes annuelles, avec une certaine tendance à l'augmentation au cours des années observées (voir graphique 2.4.10). Comme on peut le constater, la production totale de ciment en 2004 dans les pays du PAM a été de 250,75 millions de tonnes.

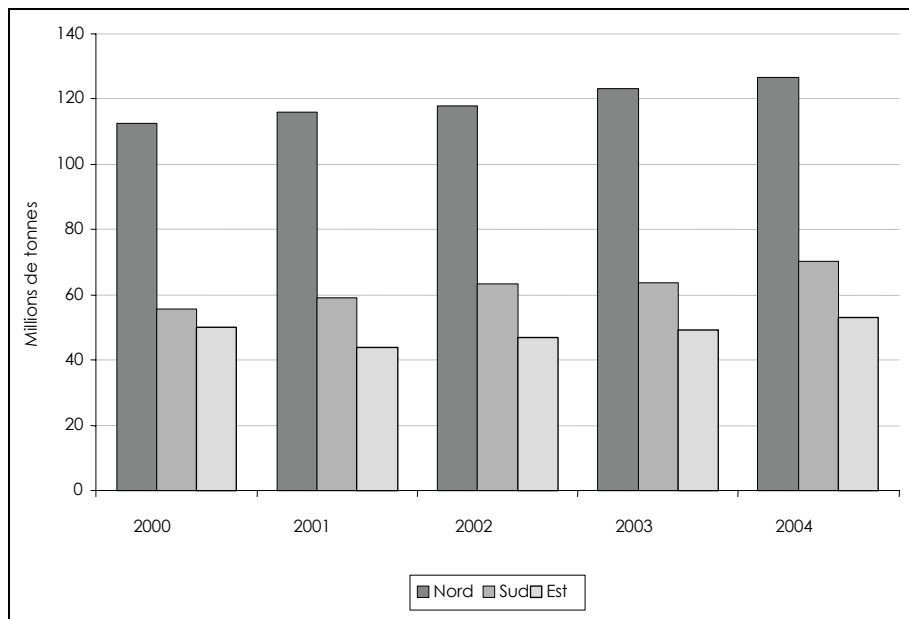


Graphique 2.4.10. Production globale de ciment dans les pays du PAM (en millions de tonnes).

La production de ciment, tout comme la consommation, présente une différence considérable entre les différentes régions de la Méditerranée (voir graphique 2.4.11). En 2004, 51 % de la production totale de ciment dans les pays du plan d'action pour la Méditerranée correspond aux pays du nord de la Méditerranée, alors que ce chiffre est de 28 % et 21 % respectivement pour les pays du sud et de l'est de la Méditerranée. La même tendance se confirme au cours du temps (voir graphique 2.4.12).



Graphique 2.4.11. Production globale de ciment dans les pays du PAM en 2004.



Graphique 2.4.12. Production de ciment des pays du PAM.

3. DESCRIPTION DES PROCÉDES

Le ciment est un matériau inorganique, non métallique, de couleur grise ou blanche, finement broyé et qui, lorsqu'il est mélangé à de l'eau, forme une pâte fluide qui prend et durcit pour former une roche artificielle (mortiers et bétons). Ce durcissement hydraulique est principalement dû à la formation de silicates calciques hydratés qui se produit en raison d'une réaction entre l'eau et les constituants du ciment. Cette propriété de liant hydraulique en fait un matériau de construction de base, indispensable pour la construction et la création d'infrastructures.

Il est fabriqué à partir d'un mélange de clinker (résultat de la calcination jusqu'à la fusion partielle de mélanges de calcaires et d'argiles) et de plâtre qui agit comme régulateur de prise. On peut en outre y ajouter d'autres types d'adjuvants actifs tels que des cendres volantes, du laitier de haut-fourneau, du calcaire, de la fumée de silice, des pouzzolanes, de la bauxite, du sable ou des minerais de fer.

3.1. MATIÈRES PREMIÈRES

3.1.1. Matières premières de base

Le processus de fabrication du ciment commence par l'obtention des matières premières nécessaires pour obtenir la composition souhaitée d'oxydes métalliques pour la production de clinker (voir section 3.2.4. *Cuisson du clinker*).

Les principales matières premières pour la fabrication de clinker sont les suivantes :

- Un apport de carbonate : généralement des calcaires ou marnes, qui se chargent d'apporter le CaO qui réagit postérieurement dans le four pour former les silicates, c'est-à-dire les composants réellement actifs du clinker ;
- Un apport de fondants : généralement des argiles ou ardoises, qui se chargent d'apporter les oxydes qui agissent comme fondants et contribuent à la formation de phase liquide dans le four, ce qui favorise les réactions.

Pour la production de ciment, comme indiqué auparavant, du plâtre est ajouté au clinker comme contrôleur de prise.

Le tableau 3.1.1 indique la composition typique de quelques matières premières de base :

Tableau 3.1.1. Composition des matières premières de base.

Constituant	Calcaire	Marne	Argile
SiO ₂	0,5-3	3-50	37-78
Al ₂ O ₃ + TiO ₂	0,1-1	1-20	7-30
Fe ₂ O ₃ + Mn ₂ O ₃	0,1-0,5	0,5-10	2-15
CaO	52-55	5-52	0,5-25
MgO	0,5-5	0,5-5	= 5
K ₂ O	= 0,3	= 3,5	0,55
Na ₂ O	= 0,1	= 0,2	0,1-0,3
SO ₃	= 0,1	0,1-4	= 3
CO ₂ + H ₂ O	40-44	2-42	1-20

Source : VDZ et autres références
(* Valeurs exprimées en % de poids)

3.1.1.1. Calcaire

Les calcaires sont des roches sédimentaires formées par dépôt des produits d'altération chimique et physique de roches préexistantes primitives comme le feldspath calcique. Leur composant fondamental est le CaCO₃. On le trouve dans les couches superficielles de nombreuses collines et montagnes, dans des dépôts d'une profondeur variable, jusqu'à plus de 200 mètres. Pour fabriquer le ciment, on extrait de grands volumes de calcaire, car ce dernier constitue environ 80 % des matières premières qui composent le clinker (voir section 3.2.4.1 *Composition du clinker*). En outre, la pierre calcaire peut être broyée en même temps que le clinker comme complément du ciment, car elle n'intervient pas dans les réactions de durcissement.

Les carrières de calcaire se trouvent normalement à proximité des installations de production du ciment ; si ce n'était pas le cas, le coût du ciment augmenterait considérablement. En raison de sa dureté, le calcaire est extrait des carrières à l'aide d'explosifs. Une explosion peut abattre entre 30 000 et 100 000 tonnes de matière première.

3.1.1.2. Marne

La marne se compose d'argiles et de carbonates. On distingue divers types de marnes en fonction des rapports quantitatifs des différents composants : marne argileuse, marne et marne calcaire. La marne contient souvent des nodules de plâtre, de calcite et de pyrite, et elle est de couleur gris clair à gris foncé, brune ou verdâtre. La taille des grains est identique à ceux de l'argile (< 0,02 mm). La marne étant un produit abondant contenant des matériaux calcaires et argileux à l'état homogénéisé, elle constitue une excellente matière première pour la fabrication du ciment.

3.1.1.3. Argile

L'argile est la seconde matière première en importance dans la fabrication du ciment car, si le calcaire employé ne contient pas suffisamment d'alumine et de silice, il est nécessaire d'y ajouter du matériau argileux. Les argiles se composent principalement d'hydrosilicates d'alumine, mais leur composition minéralogique et chimique est variable, des argiles composées exclusivement de silicates d'aluminium (argiles blanches) aux argiles qui peuvent contenir plus de 50 % de silice libre, ou de l'hydroxyde de fer, du sulfure de fer, du carbonate de calcium, etc. L'hydroxyde de fer est le composant colorant le plus fréquent des argiles. Comme il présente de gros grains, on préfère la présence de silice finement divisée. L'argile est également la principale source d'alcalis dans le processus de fabrication du ciment.

3.1.1.4. Ardoise

On appelle « ardoise » les argiles composées principalement de 45 à 65 % d'oxydes de silice, de 10 à 15 % d'oxydes d'aluminium, de 6 à 12 % d'oxydes de fer et de volumes variables allant de 4 à 10 % d'oxyde de calcium. C'est également la principale source d'alcalis. L'ardoise compte environ pour 15 % des matières premières qui composent le clinker. Puisque ces minéraux sont relativement mous, leur système d'extraction est similaire à celui du calcaire, mais avec des explosifs moins puissants.

3.1.1.5. Plâtre/anhydrite

Le plâtre ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et l'anhydrite (CaSO_4), tous les deux sulfates de calcium, sont considérés comme des matières premières fondamentales dans la production de ciment. Ils sont ajoutés au clinker en raison de la capacité de réglage de la prise et du durcissement que possèdent les produits obtenus après déshydratation partielle ou totale, en les gâchant avec des petites quantités d'eau (voir section 3.2.8. *Mise en œuvre du ciment*). Le plâtre, très abondant dans la lithosphère, se présente sous la forme de sélénite (cristaux monocristallins), de séricolite (staff), d'albâtre gypseux, d'une structure granulaire, ou encore de masses cristallines mixtes qui constituent la pierre gypseuse, très abondante.



Calcaire

Argile

Ardoise

Plâtre

Image 3.1.1. Matières premières pour la fabrication du ciment.

3.1.2. Matières premières secondaires

Il est très habituel de devoir faire appel à d'autres matières premières secondaires, soit naturelles (matériaux pouzzolaniques, bauxite, sable, etc.), soit sous-produits ou déchets d'autres procédés de fabrication (cendres, laitier de haut fourneau, fumée de silice, etc.).

Ces matières premières peuvent être incorporées comme petits « ajouts » ou même comme « composant principal » en fonction du type de ciment. C'est le cas des matériaux pouzzolaniques, qui donnent le ciment pouzzolanique (voir section 3.2.6. Produits en ciment).

L'ajout de ces matériaux permet d'obtenir la qualité et les propriétés souhaitées du ciment.

3.1.2.1. Matériaux correcteurs

Pour corriger la composition des composés souhaités dans les matières premières, on utilise des correcteurs naturels qui apportent les principaux oxydes appelés à composer les phases principales du clinker (silicates de calcium - tri et dicalciques – et aluminates de calcium), comme par exemple : la bauxite (Al_2O_3), le minerai de fer (Fe_2O_3) et le sable (SiO_2) (voir tableau 3.1.2. *Composition des matériaux correcteurs*).

Tableau 3.1.2. Composition des matériaux correcteurs.

Constituant	Sable	Minerais de fer	Bauxite
SiO ₂	80-99	4-11	2,9
Al ₂ O ₃ + TiO ₂	0,5-3	0,2-3	57,5
Fe ₂ O ₃ + Mn ₂ O ₃	0,5-2	19-95	22,8
CaO	0,1-3	0,1-34	2,4
MgO	= 0,5	= 1,5	0,04
K ₂ O	= 1	Traces	0,04
Na ₂ O	= 0,5	Traces	0,02
SO ₃	= 0,5	Traces	0,12
CO ₂ + H ₂ O	= 5	0,1-30	13,5

Source : VDZ et autres références
 (*) Valeurs exprimées en % de poids

Sable

Le sable est un type de granulat dont les particules possèdent une taille comprise entre 0,16 et 5 mm. Les caractéristiques les plus importantes pour l'emploi des granulats sont la granulométrie, le niveau d'arrondissement, la lithologie et l'absence de verre, de matière organique, de sels solubles et d'argiles.

Minerais de fer

Les oxydes de fer naturels, en particulier l'hématite, sont utilisés comme sources de Fe₂O₃ dans la fabrication du ciment. L'oxyde de fer est en outre employé pour colorer le ciment et, de ce fait, les bétons préparés avec ce matériau, leur couleur dépendant de la couleur des granulats et de celle du ciment. Pour la fabrication du ciment, l'oxyde de fer doit contenir plus de 75 % de Fe₂O₃ et sa granulométrie doit être inférieure à 1".

Bauxite

Les minerais de bauxite sont des oxydes d'aluminium hydratés appelés gibbsite (Al₂O₃ x 3H₂O), laquelle contient 65,4 % Al₂O₃, de la boehmite et de la diaspore (Al₂O₃ x H₂O) qui contiennent 85 % de Al₂O₃. L'argile bauxitique est employée dans la fabrication du ciment car elle possède une teneur élevée en Al₂O₃, supérieure à 35 %, et un rapport favorable entre Al₂O₃ et SiO₂.

3.1.2.2. Matériaux pouzzolaniques

La pouzzolane est une autre matière naturelle utilisée dans la fabrication du ciment. Il s'agit d'une matière siliceuse ou silico-alumineuse (voir tableau 3.1.3. *Composition des pouzzolanes*) d'origine naturelle à grain fin et qui, en présence d'hydroxyde de calcium et d'eau, peut durcir à la température ambiante. Les produits de la réaction pouzzolanique sont des hydrates du silicate de calcium, les constituants qui dotent le ciment de sa résistance mécanique. Les roches sédimentaires qui contiennent des quantités supérieures de silice réactive, de même que les roches à teneur élevée en silice libre d'origine organique, appartiennent également au groupe des matières pouzzolaniques naturelles.

Tableau 3.1.3. Composition des pouzzolanes.

Constituant	Pouzzolanes
SiO ₂	53,9 - 63,2
Al ₂ O ₃	15,2-20,4
TiO ₂	0,6-1,2
P ₂ O ₅	0,1-0,2
Fe ₂ O ₃	5,2-7,9
Mn ₂ O ₃	0,1-0,3
CaO	2,7-8,5
MgO	1,1 - 2,7
SO ₃	0,0-0,3
K ₂ O	1,5-6,0
Na ₂ O	1,5-4,3
LOI	7,1-11,6
CO ₂	0,6-4,8
H ₂ O	–
S ²⁻	–
CaO _{libre}	–

Source : VDZ et autres références

(*) Valeurs exprimées en % de poids

3.1.2.3. Recyclage et valorisation matérielle et énergétique de déchets

L'industrie cimentière utilise certains déchets et sous-produits minéraux d'une composition similaire à celle de ses matières premières, ou même qui améliorent les performances des ciments. Compte tenu des énormes quantités de matières premières que le secteur traite, ce recyclage représente une grande économie de ressources naturelles et évite le rejet de grands volumes de matières qui peuvent être mises à profit.

L'utilisation de déchets et de sous-produits minéraux comme matière première dans le processus de fabrication de ciment présente les avantages suivants pour l'environnement :

- Elle évite l'occupation de décharges publiques et les impacts associés ;
- Elle permet de réduire l'exploitation de carrières en remplaçant les ressources naturelles par des déchets ;
- Elle permet de réduire la consommation d'énergie en fabriquant moins de clinker, grâce à l'utilisation des ajouts.
- Elle permet de réduire les émissions dans l'atmosphère en raison de la moindre consommation de combustibles.

Le tableau 3.1.4. indique les déchets ou sous-produits industriels les plus utilisés dans l'industrie du ciment des pays du plan d'action pour la Méditerranée :

Tableau 3.1.4. Types de déchets les plus fréquemment employés comme matières premières dans l'industrie du ciment.

TYPES DE DÉCHETS
Cendres volantes
Laitier de haut-fourneau
Fumée de silice
Laitier d'aciérie
Boues de l'industrie papetière
Cendres de pyrite
Phosphogypses (provenant de la désulfuration de gaz et de la production d'acide phosphorique)

Source : Cembureau, 1997

Cendres volantes

Les cendres volantes sont un déchet à grain fin provenant de la combustion du charbon pulvérisé. Elles se précipitent dans les précipitateurs électrostatiques ou mécaniques dont les centrales électriques sont équipées. Les cendres volantes peuvent être de nature siliceuse ou calcaire. Les premières présentent uniquement des caractéristiques pouzzolaniques, celles de nature calcaire peuvent en outre posséder des caractéristiques hydrauliques, ces dernières consistant pour l'essentiel en CaO réactif, SiO₂, et Al₂O₃.

Cendres de pyrite

Par cendres de pyrite, on entend le déchet résultant du grillage de la pyrite en vue de l'obtention d'acide sulfurique. Cette matière se compose principalement d'oxydes et d'hydroxydes de fer et d'autres métaux.

Laitier de haut-fourneau

Le laitier de haut-fourneau s'obtient de la fonte du minerai de fer dans un haut-fourneau. Sous forme de verre (amorphe), le laitier de haut-fourneau se produit par le refroidissement rapide, à l'eau et/ou à l'air comprimé, du laitier fondu pour obtenir une matière granulée. Le contenu de matière à l'état amorphe est décisif pour les caractéristiques hydrauliques et doit par conséquent être maintenu aussi élevé que possible. La teneur en matière amorphe est normalement supérieure à 90%.

Fumée de silice

La fumée de silice, également appelée dioxyde de silicium ou encore fumée de silice condensée, est une autre matière employée comme additif pouzzolanique. Il s'agit d'un sous-produit de la production d'alliages siliceux ou ferro-siliceux. Ce produit, sous forme de poudre de couleur gris clair à gris foncé ou parfois gris bleuté verdâtre, est le résultat de la réduction de quartz très pur avec du charbon minéral dans un four à arc électrique, dans le cadre de la production de la silice ou d'alliages ferro-siliceux.

Sables de fonderie

Les sables de fonderie sont constitués par des grains de quartz (dioxyde de silicium) et de l'argile (silicate d'aluminium hydraté), de sorte qu'ils peuvent être employés comme matière première dans la production de ciment.

Boues de l'industrie papetière

Les boues de l'industrie papetière peuvent être utilisées comme matière première dans la production de clinker grâce à leur teneur élevée en carbonate de calcium.

Plâtres et phosphogypses

Les plâtres résultant de la désulfuration de gaz et de la production d'acide phosphorique peuvent être utilisés comme matières premières dans le broyage du ciment.

Schistes calcinés

Ces matières sont obtenues par calcination contrôlée de minerais d'origine naturelle. Le schiste calciné, en particulier le schiste bitumineux, est produit dans un four spécial à des températures de l'ordre de 800 °C et finement broyé. Il possède des propriétés hydrauliques importantes, de même que des propriétés pouzzolaniques. La composition des schistes calcinés est la suivante : (SiO₂), CaO, (Al₂O₃), (Fe₂O₃) et autres composés.

Déchets de démolition

Déchets résultant de la démolition de bâtiments, de routes et d'autres structures.

Tableau 3.1.5. Composition des matières premières secondaires.

Constituant	Laitier de haut-fourneau granulé	Schistes calcinés	Cendres volantes pulvérisées
SiO ₂	32,3-40,5	34,3-36,7	40-55
Al ₂ O ₃	7,1-14	11,3-11,4	24-30
TiO ₂	0,3-1,9	0,6-0,6	0,7-1,3
P ₂ O ₅	0,0-0,2	0,2-0,2	0,1-1,5
Fe ₂ O ₃	0,2-2,4	7,3-10,4	5-15
Mn ₂ O ₃	0,2-1,7	0,1-0,1	0,1-0,4
CaO	35,3-45,9	27,3-31,6	1,5-8
MgO	0,0-11,7	1,8-2,0	1,5-3,5
SO ₃	0,1-0,3	10,1-11,2	0,4-2,5
K ₂ O	0,2-1,1	2 0-2,1	1,0-4,5
Na ₂ O	0,2-0,6	0,3-0,3	0,4-1,5
LOI	0,1-1,9	4,2-8,0	0,8-5,0
CO ₂	0,1-1,3	2,6-7,0	–
H ₂ O	0,1-1,1	1,0-1,7	–
S ²⁻	0,9-2,1	0,1-0,2	–
CaO _{libre}	–	–	0,1-1,5

Source : VDZ et autres références

(*) Valeurs exprimées en % de poids

Ces déchets peuvent être employés dans deux phases différentes du processus de production. L'une d'elles est la préparation initiale des matières premières ou « cru ». L'autre est la phase de broyage du clinker avec d'autres minéraux pour former le ciment :

Dans la préparation du cru.

L'obtention du clinker nécessite certains minéraux qui peuvent être trouvés dans la nature ou dans des déchets. Les exemples de déchets et sous-produits suivants sont recyclés dans d'autres procédés industriels et utilisés dans la préparation du cru :

- Cendres de pyrite, en raison de leur teneur élevée en fer ;
- Laitier sec de haut-fourneau ;
- Boues de l'industrie papetière, en raison de leur teneur élevée en carbonate de calcium ;
- Sables de fonderie, en raison de leur teneur élevée en oxyde de silicium ;
- Déchets de démolition, de nature calcaire ou siliceuse.

Dans le broyage de ciment.

Les matières susceptibles d'être employées comme composants dans le broyage de ciment (comme ajouts au clinker) possèdent des caractéristiques qui améliorent ses propriétés, comme la facilité de mise en œuvre, la rétention d'eau, la durabilité, la résistance mécanique, la résistance aux sulfates, la résistance au gel, etc. Ces matières peuvent être naturelles, comme c'est le cas des pouzzolanes, ou provenir de sous-produits d'autres procédés industriels tels que :

- Laitier de haut-fourneau ;
- Pouzzolanes industrielles ;
- Cendres volantes de centrales thermiques ;
- Fumée de silice de l'industrie des ferro-alliages ;
- Schistes calcinés ;
- Sulfate de calcium provenant de la désulfuration de gaz industriels et de la préparation d'acide phosphorique (plâtre/phosphogypses).

Les ajouts sont dosés de façon contrôlée sur des balances et introduits tous ensemble dans les broyeurs. La proportion relative de chaque composant est ajustée d'une manière automatique en fonction des résultats des analyses réalisées avec des analyseurs à rayons X.

3.2. DESCRIPTION DES PROCÉDÉS DE PRODUCTION

La chimie de base du processus de fabrication du ciment commence par la décomposition du carbonate de calcium (CaCO_3) à environ 900 °C, qui donne de l'oxyde de calcium (CaO , chaux) et libère du dioxyde de carbone gazeux (CO_2). Ce procédé est connu sous le nom de calcination ou décarbonatation. Il est suivi du procédé de clinkérisation, dans lequel l'oxyde de calcium réagit à une température élevée (normalement 1 400 à 1 500 °C) avec la silice, l'alumine et l'oxyde de fer pour former les silicates, aluminates et ferrites de calcium qui composent le clinker. Le clinker est broyé avec du plâtre et d'autres ajouts pour produire le ciment.

Il existe quatre procédés pour fabriquer le ciment : fabrication par voie sèche, semi-sèche, semi-humide et humide :

- **Fabrication par voie humide** : les matières premières (dont l'humidité est souvent élevée) sont broyées avec de l'eau pour former une pâte pouvant être pompée. La pâte est envoyée directement au four ou passe auparavant par un sécheur à pâte ;
- **Fabrication par voie semi-humide** : le mélange cru humide est partiellement séché dans des filtres-presses. Les tourteaux du filtre sont soit extrudés en granules et envoyés à un préchauffeur à grille, soit directement envoyés à un sécheur à tourteaux de filtration pour la production de cru, ce dernier étant ensuite broyé, séché et envoyé à un four à préchauffage en suspension ;

- **Fabrication par voie semi-sèche** : la farine crue sèche est pelletisée (granules) avec de l'eau et envoyée à un préchauffeur à grille avant de passer au four ou, dans certains cas, à un four long équipé de chaînes ;
- **Fabrication par voie sèche** : les matières premières sont concassées et séchées pour former le cru ou farine, qui a l'aspect d'une poudre fluide. Le cru est envoyé à un four avec préchauffeur ou avec précalcinateur, ou, plus rarement puisqu'il est pratiquement devenu obsolète, à un four long à voie sèche. Dans ce procédé, le contrôle chimique des matières premières est très efficace et la consommation d'énergie est inférieure car, puisqu'il n'est pas nécessaire d'éliminer l'eau ajoutée, les fours sont plus courts et le clinker est soumis moins longtemps aux températures élevées. La figure 3.2.1. montre un diagramme de flux d'un procédé par voie sèche avec four à précalcinateur.

La sélection du procédé revêt une grande importance et dépend en grande partie de l'état des matières premières (sèches ou humides).

Du point de vue historique, le développement du procédé de fabrication du clinker se caractérise par le passage du système « humide » au système « sec ». Les premiers fours – apparus vers 1895 – étaient des fours longs qui travaillaient par voie humide. Ces fours permettaient de manipuler et d'homogénéiser facilement les matières premières, en particulier si ces dernières étaient mouillées ou si la composition chimique des matières isolées présentait de grandes fluctuations. Avec une technologie plus moderne et avancée, il a été possible d'alimenter le procédé avec une matière homogène par voie sèche, c'est-à-dire sans ajouter d'eau pour préparer un mélange cru. Le principal avantage de la voie sèche moderne par rapport à la voie humide traditionnelle réside dans une consommation de combustible plus réduite et, par conséquent, dans des coûts et des émissions plus faibles.

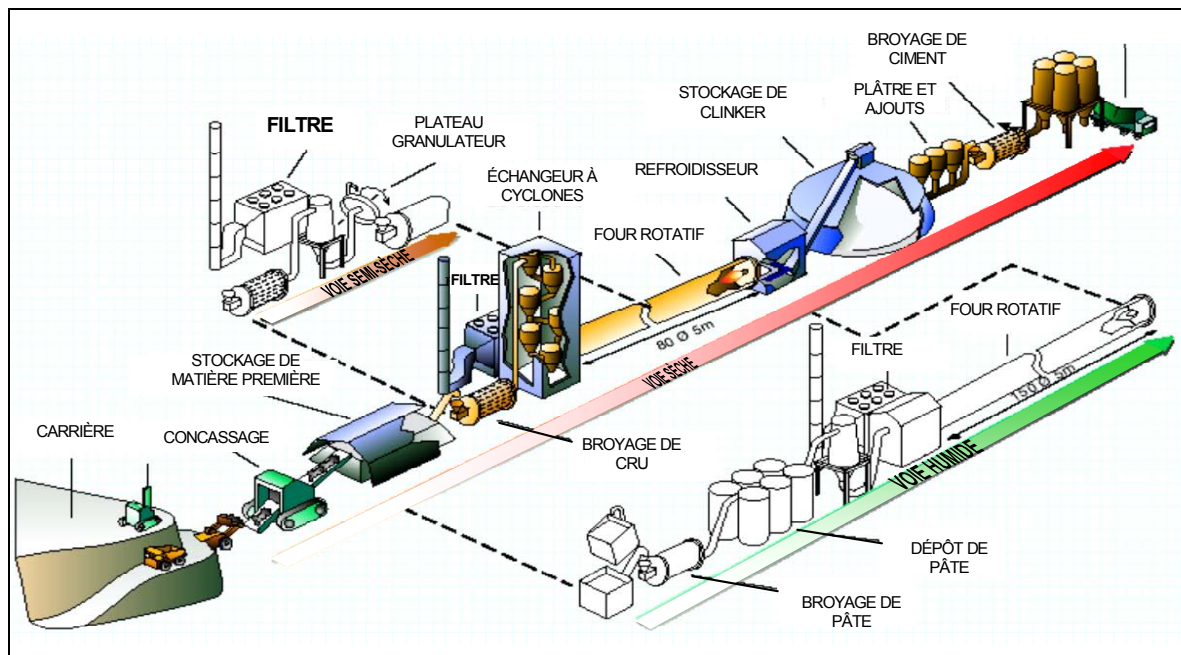


Figure 3.2.1. Procédé de fabrication du ciment. Source : Documents de référence sur les meilleures techniques disponibles applicables à l'industrie du ciment.

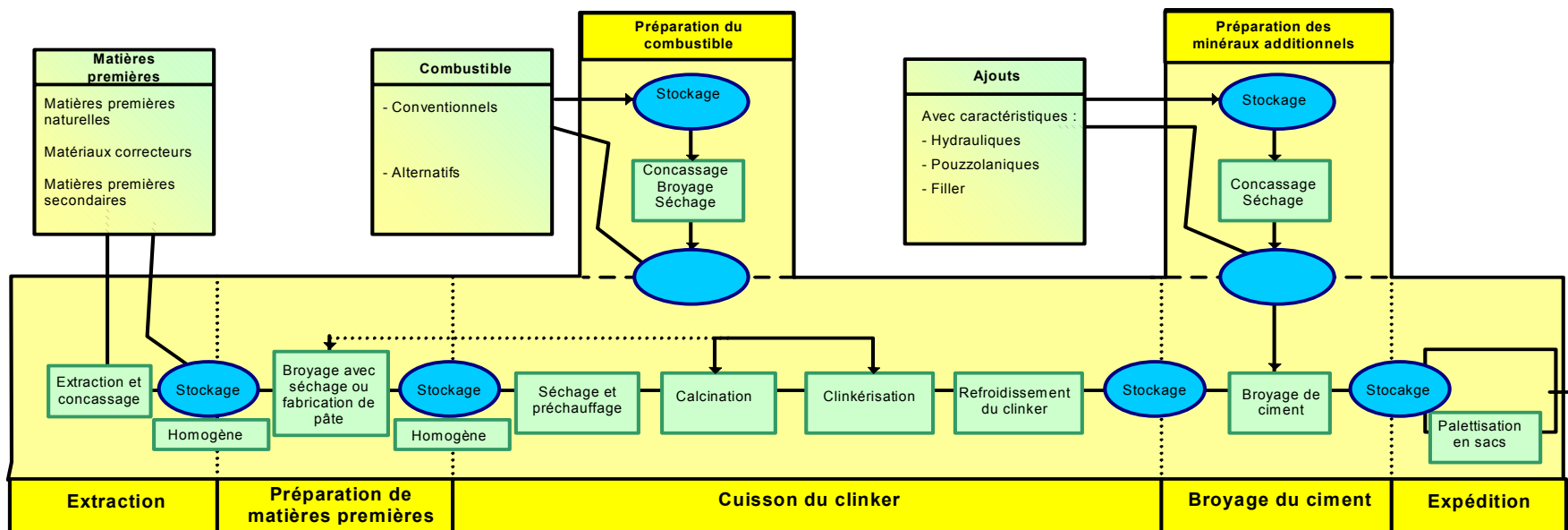
De nos jours, le procédé par voie humide n'est utilisé qu'en cas d'exigences particulières vis-à-vis des matières premières ou du procédé.

Tous les procédés présentés auparavant ont en commun les six étapes suivantes :

- Obtention (extraction) des matières premières ;
- Stockage et préparation des matières premières pour l'obtention du cru ;
- Stockage et préparation de combustibles ;

- Cuisson des matières premières pour l'obtention du clinker ;
- Broyage du clinker avec d'autres composants en vue de l'obtention de ciment ;
- Stockage, ensachage et expédition du ciment.

La figure 3.2.2. illustre les différentes étapes ou opérations unitaires communes aux procédés de fabrication de ciment :



Source : Cembureau, 1997

Figure 3.2.2. Étapes ou opérations unitaires communes aux procédés de fabrication du ciment.

Le tableau 3.2.1. montre les différentes opérations unitaires nécessaires en fonction du procédé de production :

Tableau 3.2.1. Opérations unitaires en fonction du procédé de production.

Sous-procédés	Étapes des procédés	PROCÉDÉS DE PRODUCTION							
		Sec		Semi-sec		Semi-humide		Humide	
Extraction	Extraction des matières premières	x		x		x		x	
	Concassage des matières premières	x		x		x		x	
	Stockage des matières premières	x		x		x		x	
	Préhomogénéisation des matières premières	x		x					
Préparation des matières premières	Broyage du cru/séchage en broyeur à boulets, broyeur vertical, etc.	x		x					
	Stockage du cru	x		x					
	Mélange et homogénéisation du cru	x		x					
	Pelletisation du cru				x				
	Broyage de la pâte						x		x
	Mélange et stockage de la pâte						x		x
	Homogénéisation de la pâte						x		x
	Filtration de la pâte avec des filtres-presses						x		
	Stockage du tourteau de filtration						x		
	Agglomération du tourteau de filtration							x	
Cuisson du clinker	Identification détaillée du procédé (*)	1	2	3	4	5	6	7	8
	Équipements de séchage de granules ou nodules de pâte internes dans les fours longs				x				x
	Équipements de séchage de granules, nodules ou tourteau de filtration de pâte externes au four			x		x	x	x	
	Préchauffage du cru	x	x	x	x	x	x	x	x
	Calcination du cru	x	x	x	x	x	x	x	x
	Clinkérisation du cru	x	x	x	x	x	x	x	x
	Refroidissement du cru	x	x	x	x	x	x	x	x
	Stockage du cru	x	x	x	x	x	x	x	x
Broyage du	Broyage du ciment en broyeur à boulets, presse à cylindres, broyeurs verticaux, etc.	x		x		x		x	
	Stockage du ciment	x		x		x		x	
Expédition du ciment	Expédition en vrac, ensaché ou palettisé par transport routier, ferroviaire ou maritime	x		x		x		x	

Source : Cembureau, 1997

Identification détaillée du procédé (*)

1. Fours avec préchauffeur à 4 étages ou de 4 à 6 étages de cyclones ;
2. Fours longs à voie sèche, fours avec préchauffer de 1 à 2 étages de cyclones ;
3. Préchauffeur à grille mobile (Lepol) ;
4. Fours longs à granules avec système interne de croisement ;
5. Fours avec préchauffeur à cyclones et précalcination avec séchage externe ;
6. Préchauffeur à grille mobile (Lepol) ;
7. Fours avec précalcinateur à 2 étages avec séchage externe de pâte ;
8. Fours longs humides avec système de chaînes.

Le tableau 3.2.2. montre les caractéristiques techniques en fonction du procédé de production, qui sont détaillées dans les sections correspondantes du présent chapitre :

Tableau 3.2.2. Caractéristiques de fonctionnement des procédés dans le four.

TYPE DE PROCÉDÉ		SEC			SEMI-SEC		SEMI-HUMIDE		HUMIDE	
Type de four Lepol = préchauffeur à grille mobile SP = Four avec préchauffeur à cyclones PC = Four avec préchauffeur et précalcinateur à cyclones		Long 1 étage SP 2 étages SP	4 étages SP	De 4 à 6 étages PC	Long	Lepol	Lepol (3 chambres)	De 3 à 4 étages SP et PC avec séchage	Long	2 étages PC avec séchage
CARACTÉRISTIQUES DU FOUR	Alimentation	Matière première sèche			Matière première pelletisée		Tourteau de filtration		Pâte	
	Pourcentage d'humidité [%]	0,5-1,0			10-12		16-21		28-43	
	Dispositif d'échangeur de chaleur	Préchauffeur à cyclones et chaînes	Préchauffeur à cyclones	Préchauffeur à cyclones	Échangeurs croisés	Préchauffeur à grille mobile	Préchauffeur à grille mobile	Préchauffeur à cyclones	Chaînes et échangeurs croisés	Préchauffeur à cyclones
	Capacité du four [t/j]	300-2600	300-4000	2000-10000	300-1500	300-2000	300-3000	2000-5000	300-3600	2000-5000
	Consommation spécifique de chaleur	3,6-4,5	3,1-3,5	3,0-3,2	3,5-3,9	3,2-4,5	3,6-4,5	3,4-3,6	5,0-7,5	4,5-50
ADDITIFS DE PROCÉDÉ	Flux des gaz de combustion de la cheminée [Nm ³ /kg cli [sec]	1,7-2,0	1,8-2,0	1,8-1,9	1,7-1,8	1,9-2,1	3,4-4,0	2,1-2,3	2,2-3,2	2,1-2,3
	Teneur en O ₂ [%vol]	4-5	8-9	8-9	4-5	6-10	12-14	8-10	4-5	5-6
	Température à l'entrée de l'épurateur de gaz [°C]	150	150	150	200	100	100	120-150	180-220	120-150
	Point de rosée	45-65			50-60		55-65		70-80	

Source : Cembureau, 1997

Le procédé par voie sèche

Dans le procédé par voie sèche, la farine ou cru est introduite dans le four sous une forme sèche et pulvérulente. Le cru est préparé par séchage et broyage des composants des matières premières

dans des broyeurs à boulets, ou broyeurs verticaux à cylindres, en mettant à profit les gaz de combustion chauds ou les gaz de refroidissement du clinker pour le séchage.

Il est ensuite homogénéisé et/ou mélangé dans des silos par des systèmes continus ou par lots. Avant de pénétrer dans le four, le matériau cru finement broyé et homogénéisé est préchauffé à une température de l'ordre de 810 à 830 °C. Dans les fours à préchauffage en suspension (voir section 3.2.4.3. *Fours rotatifs*), le cru alimente un certain nombre de cyclones, il est introduit par l'étage de cyclones supérieur, puis descend vers les cyclones inférieurs à contre-courant par rapport aux gaz chauds de la combustion. Ce contact du cru en suspension avec les gaz provoque un échange de chaleur efficace, qui fait que la farine pénètre dans le four partiellement calcinée (à environ 1 000 °C), tandis que les gaz abandonnent l'échangeur à une température de l'ordre de 400 °C, en cédant une partie de cette chaleur résiduelle au séchage des matières premières lors de leur passage par le broyeur de cru. Enfin, les gaz se dirigent vers le précipitateur électrostatique en vue de leur épuration (voir section 4.1. *Principales émissions dans l'atmosphère et contrôle*, et section 5.5. *Alternatives technologiques pour le contrôle des émissions de particules*).

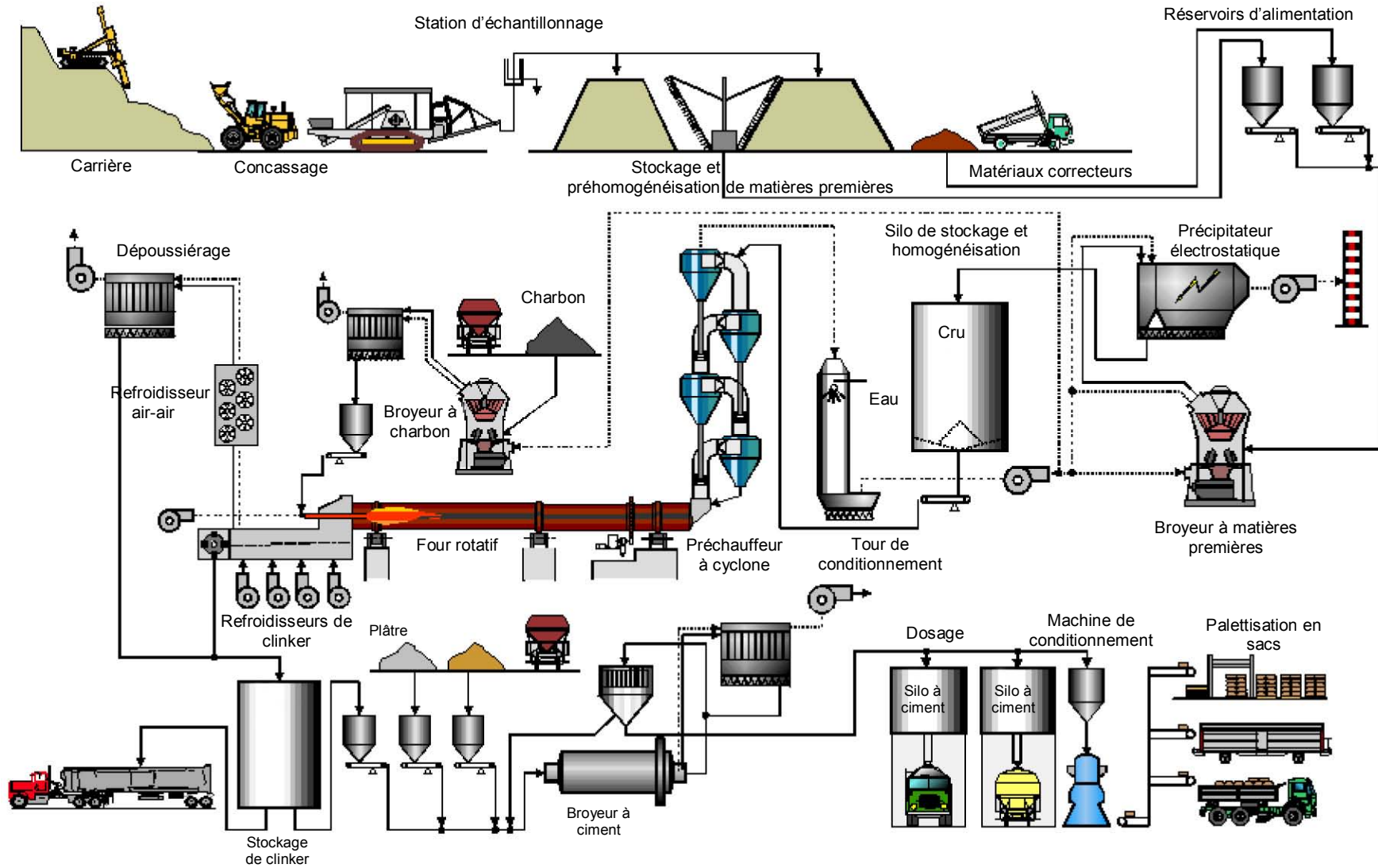
La poudre recueillie dans le précipitateur électrostatique ou électrofiltre, tout comme celle collectée dans les filtres à manches, est réintroduite dans le procédé, soit avec les matières premières, soit via le brûleur avec le combustible. Elle peut aussi être ajoutée au broyeur de ciment.

Dans le procédé par voie sèche de four-échangeur, les concentrations élevées d'alcalis et de chlorures peuvent entraîner des engorgements dans l'échangeur, en particulier dans les cyclones inférieurs. Dans le produit final, elles peuvent en outre provoquer une réaction avec certains granulats à haute teneur en silice. Il est possible de lutter contre ces inconvénients en procédant à l'extraction via un système de by-pass d'une partie des gaz dans cette zone, ces derniers entraînant des particules chargées d'halogénures alcalins, permettant de refroidir aussitôt et donc de condenser les alcalis, avant que les particules soient collectées dans l'électrofiltre ou dans le filtre à manches. Cette poudre est habituellement recyclée dans le procédé.

Il est possible d'obtenir une augmentation considérable de la capacité de production de clinker en employant des fours avec précalcinateur (voir section 3.2.4.3. *Fours rotatifs*), dans lesquels est disposé un second dispositif de combustion entre le four et la section du préchauffeur. Le précalcinateur permet de brûler jusqu'à 60 % du combustible total du système du four. Les systèmes de fours avec préchauffeur et précalcinateur à cyclones de 5 à 6 étages sont considérés comme la technologie standard pour les nouvelles usines, car les étages additionnels de cyclones améliorent le rendement thermique.

Dans certains cas, le cru est directement envoyé à un four long sec sans préchauffeur externe. C'est le cas des fours longs (voir section 3.2.4.3. *Fours rotatifs*). Un système de chaînes situé à l'entrée du four permet d'assurer l'échange de chaleur entre les gaz de combustion de la zone chaude du four et l'alimentation du four.

Cependant, si l'humidité des matières premières permet le procédé par voie sèche, les nouvelles installations ont recours à des fours plus courts avec diverses étapes d'échange de chaleur, car ces derniers sont plus efficaces du point de vue énergétique, les fours longs se caractérisant par une consommation énergétique élevée.



Source : Cembureau

Figure 3.2.3. Procédé de production du ciment par voie sèche.

Le procédé par voie semi-sèche

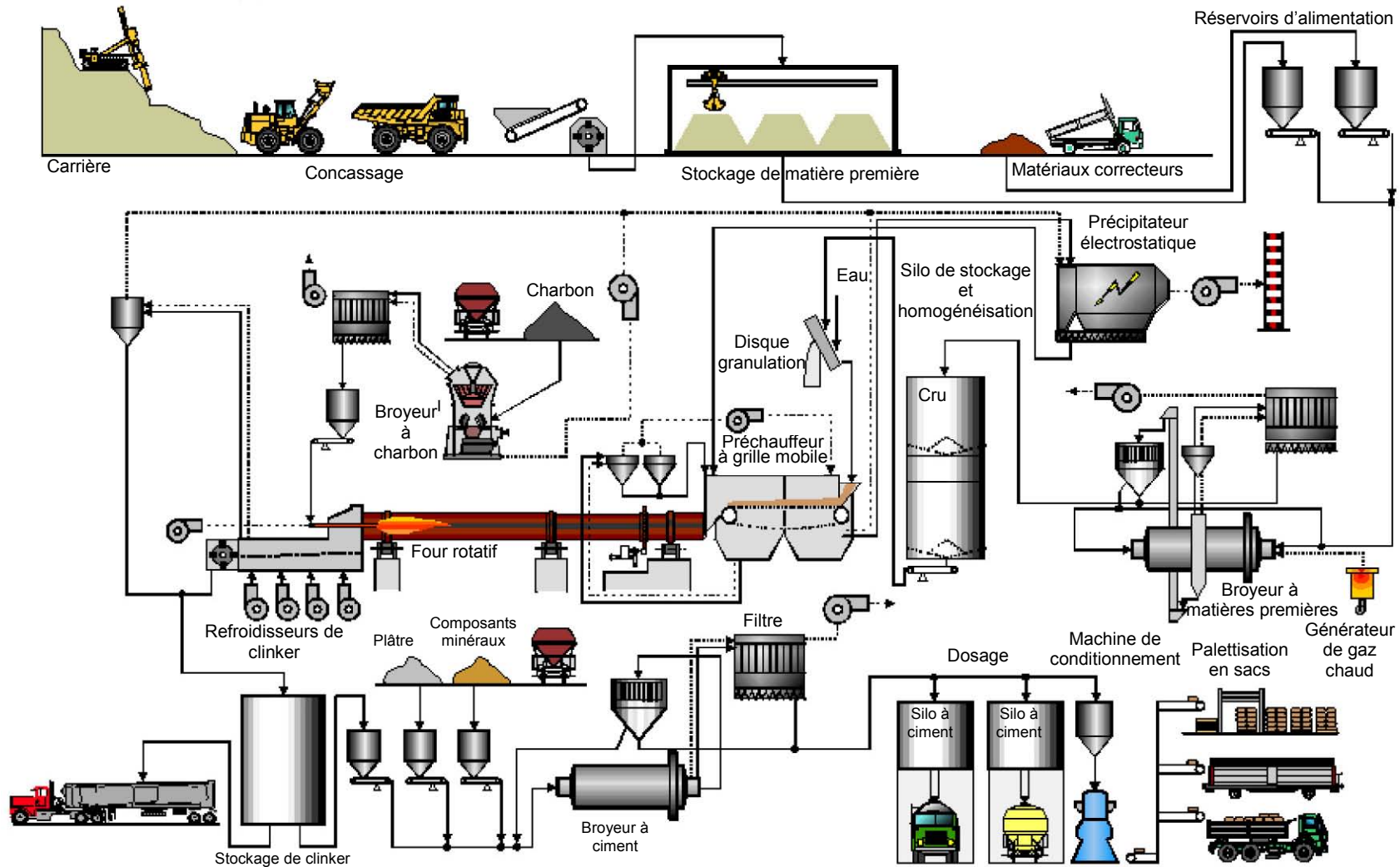
Dans le procédé semi-sec, le cru sec est pelletisé (granules) avec de l'eau pour former des granules contenant 10-12 % d'eau, qui sont déposés sur des grilles mobiles à travers lesquelles on fait circuler des gaz chauds provenant du four (système de « Lepol »), qui permettent de sécher, de préchauffer et de précalciner partiellement le cru.

Le four Lepol (voir section 3.2.4.3. *Fours rotatifs*) est le premier système dans lequel une partie de l'étape de cuisson (la calcination) a lieu dans une installation stationnaire à l'extérieur du four. Il est possible d'atteindre un niveau plus élevé de calcination en brûlant une partie du combustible dans le compartiment chaud du préchauffeur à grille.

Les gaz de combustion chauds du four passent d'abord à travers les couches de granules préchauffées dans la chambre à gaz chaud, puis à travers des cyclones collecteurs de poudre. Après avoir été partiellement dépoussiérés dans les cyclones, les gaz passent à travers le compartiment de séchage du préchauffeur à grille.

Un inconvénient du procédé par voie semi-sèche est que les gaz de combustion du four ne peuvent pas être utilisés à l'étape de séchage ni de broyage du cru, en raison de leur température réduite.

Les installations modernes utilisent rarement ce procédé, car les coûts de maintenance des préchauffeurs à grille sont assez élevés.



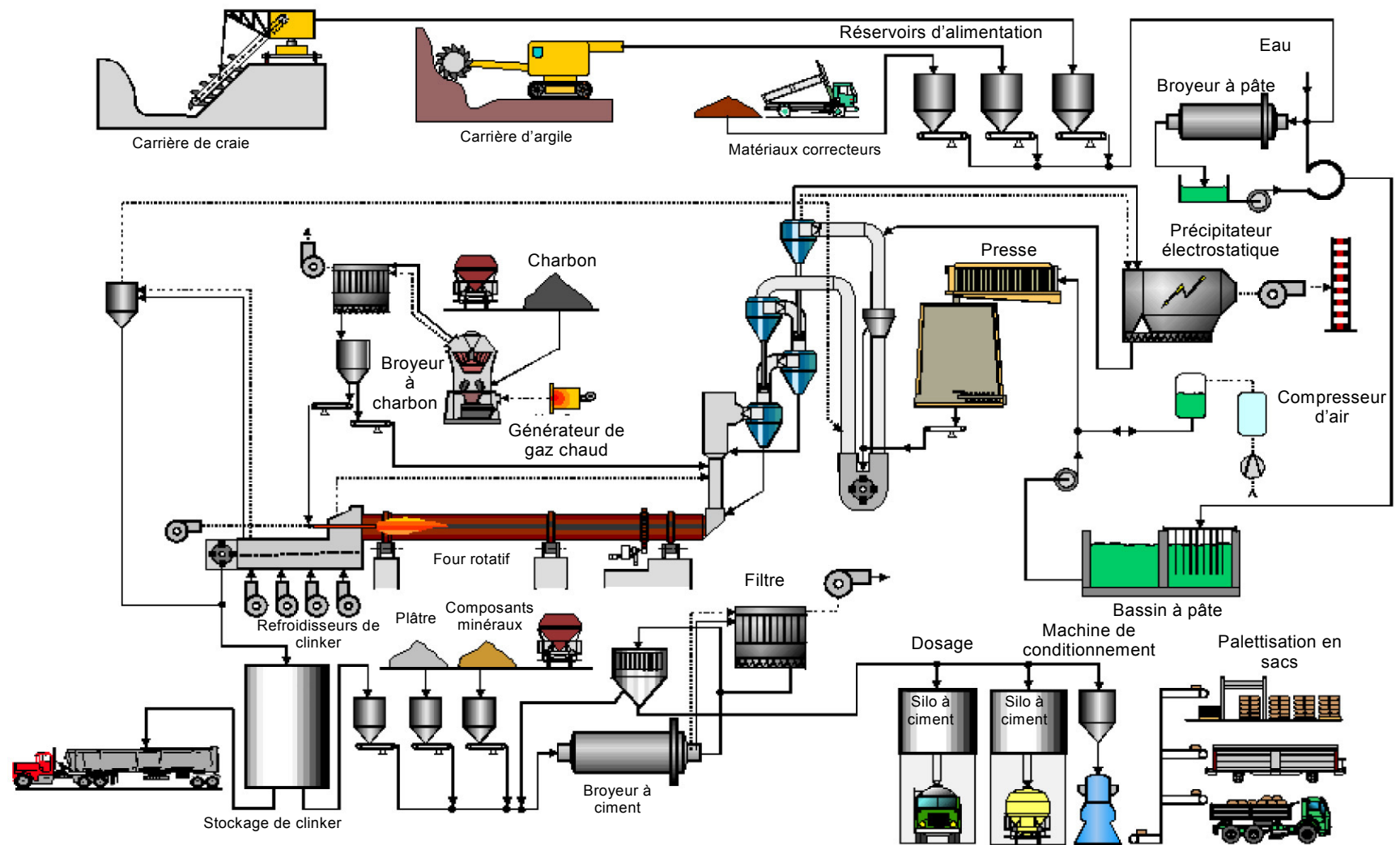
Source : Cembureau

Figure 3.2.4. Procédé de production du ciment par voie semi-sèche.

Le procédé par voie semi-humide

Dans le passé, on faisait passer la matière première, pâte de cru et eau, à travers un filtre-presse, et les tourteaux de filtration étaient extrudés sous la forme de granules pour être envoyés aux fours à préchauffage à grille. Dans les usines modernes, les tourteaux de filtration sont entreposés dans des compartiments intermédiaires avant d'être envoyés à des broyeurs ou à des sécheurs, où est produit le cru sec qui alimente un four rotatif moderne avec précalcinateur et/ou préchauffeur.

Les préchauffeurs à grille semi-humides fonctionnent de la même manière que les semi-secs, décrits plus haut, à la seule différence qu'il est possible d'installer des systèmes de triple passage de gaz.



Source : Cembureau

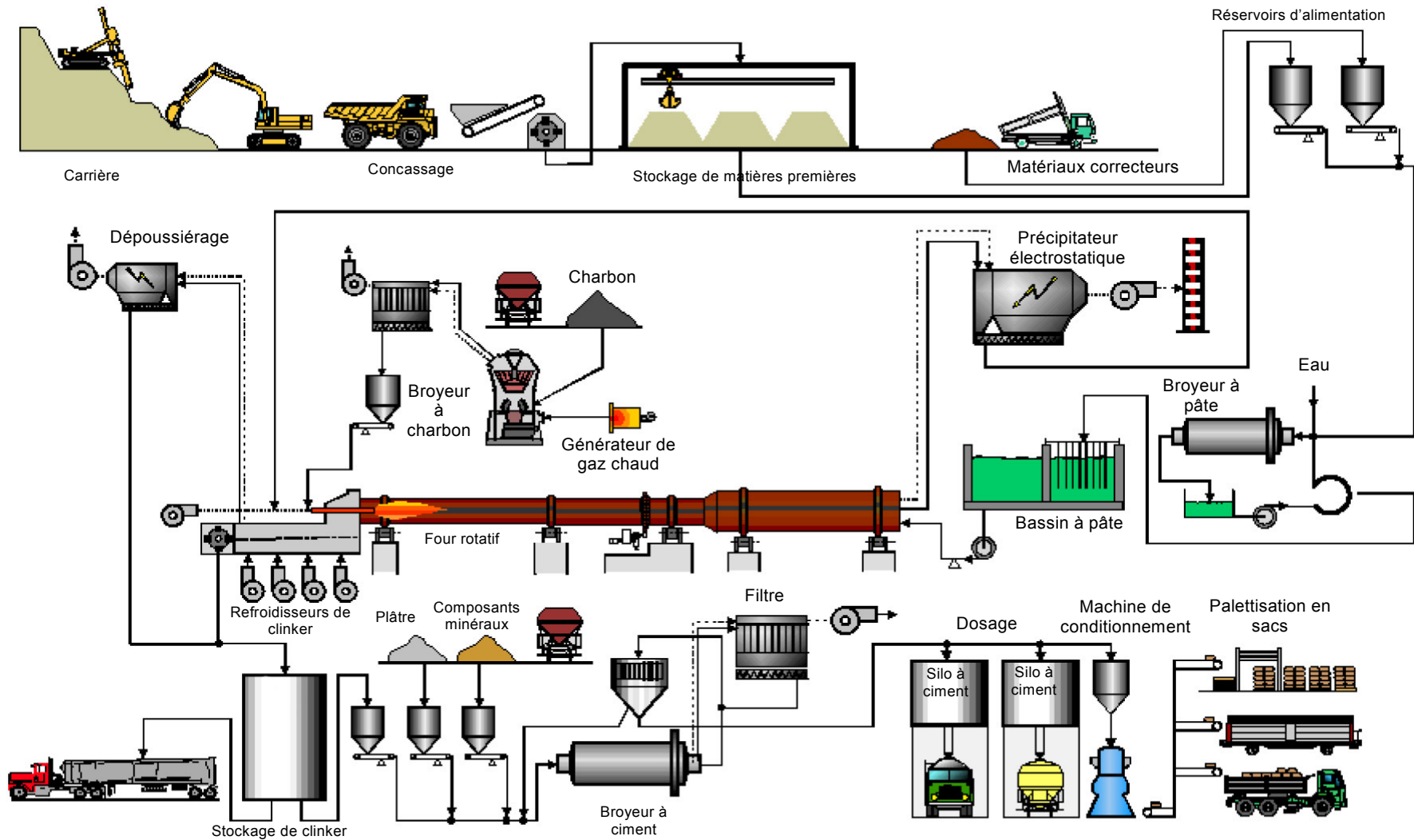
Figure 3.2.5. Procédé de production du ciment par voie semi-humide.

Le procédé par voie humide

Dans le procédé par voie humide, les matières premières sont broyées avec de l'eau pour former une pâte pouvant être pompée, contenant environ 30 à 40 % d'eau. Une fois mélangée et homogénéisée dans des silos spéciaux, la pâte peut être soit directement envoyée au four, soit passer au préalable par un sécheur à pâte (dans les systèmes par voie humide modernes).

Dans le four, l'eau s'évapore dans la zone de séchage, juste à l'entrée de cette dernière. La zone de séchage est munie de chaînes qui favorisent l'échange de chaleur entre le mélange et les gaz de combustion. Après avoir traversé la zone de séchage, le cru descend à travers le four, où il est calciné et brûlé dans la zone de frittage pour ainsi former le clinker. La longueur totale des fours rotatifs par voie humide peut atteindre jusqu'à 240 m, à la différence des fours secs courts, dont la longueur est comprise entre 55 et 65 m (sans compter la section du préchauffeur).

Ce type de procédé se caractérise par une consommation élevée de chaleur, la consommation énergétique étant 100 % plus élevée que dans le cas des procédés par voie sèche. Il produit en outre de grands volumes de gaz de combustion et de vapeur d'eau. En général, il n'est par conséquent utilisé que si les matières premières l'exigent en raison de leur teneur élevée en humidité.



Source : Cembureau

Figure 3.2.6. Procédé de production du ciment par voie humide.

3.2.1. Obtention des matières premières

Le procédé de fabrication du ciment est un processus industriel dans lequel de grandes quantités de matières premières sont transformées en produits commerciaux tels que le clinker ou le ciment.

3.2.1.1. Exploitation des matières premières

Comme déjà indiqué auparavant, les matières premières principales, telles que le calcaire et l'argile, sont extraites de carrières, dans la plupart des cas proches de l'usine. L'extraction et la production de ciment sont généralement réalisées sous une forme intégrée. L'extraction se fait à l'explosif.

Les impacts produits par les explosions sont minimes si la technologie employée est moderne.

3.2.1.2. Transport des matières premières

Les grandes masses de pierre ayant été fragmentées, elles sont transportées en camions à l'unité de concassage.

3.2.1.3. Concassage des matières premières

Le matériau de la carrière est fragmenté dans les concasseurs, dont la trémie reçoit les matières premières qui, par l'effet d'impacts et/ou de pression, sont réduites à des tailles inférieures à 40 mm.

Après le concassage primaire, les matières premières sont transportées à l'usine de ciment pour leur stockage en vue d'une préparation ultérieure.



Figure 3.2.7. Concassage des matières premières.



Figure 3.2.8. Pierre calcaire concassée.

3.2.2. Stockage et préparation des matières premières

3.2.2.1. Stockage des matières premières

Une fois concassée, chaque matière première est entreposée dans des hangars ou dans des silos, prête à être envoyée au broyeur de cru. Il faut environ 1,5 à 1,6 tonnes de matières premières (sèches) pour produire une tonne de clinker.

La nécessité d'employer des entrepôts couverts dépend des conditions climatiques et du pourcentage de produits fins dans les matières premières lorsqu'elles abandonnent l'installation de concassage. Dans le cas d'une usine produisant 3.000 t/jour de clinker, le stockage moyen estimé est compris entre 20.000 et 40.000 t de matériau.

Les matières premières secondaires, qui sont normalement fournies via des sources externes, peuvent être entreposées dans des silos ou des trémies, avec les matières premières de base ou séparément, et sont finalement préparées ensemble. Les matières premières secondaires possédant des propriétés dangereuses, telles que les cendres volantes et les phosphogypses, doivent être entreposées et préparées conformément à des exigences spécifiques.

La matière première acheminée vers le four doit être aussi homogène que possible du point de vue chimique. Le contrôle de l'alimentation de l'installation de broyage de cru permet de le garantir. Lorsque la qualité du matériau de la carrière est variable, une préhomogénéisation initiale peut être obtenue en empilant le matériau par couches longitudinales (ou circulaires) en fonction du type de parc, et en l'extrayant ultérieurement en prélevant des sections transversales de toute la pile. Il est ainsi possible de compenser la variation de la qualité de la matière première avec une efficacité de mélange de 70 à 90 %. Si le matériau de la carrière est homogène, des systèmes d'empilement et d'extraction plus simples peuvent être utilisés.

Les méthodes de stockage les plus communes sont décrites ci-dessous.

Méthodes de stockage de matières premières (sans préhomogénéisation)

Les stockages sans préhomogénéisation sont utilisés pour les matières premières qui n'ont pas besoin d'être homogénéisées :

- Méthode de stockage en strates : principalement avec stockage en couches longitudinales, avec bras d'empilement et récupération au moyen de collecteurs à godets latéraux, avec portique ou semi-portique, ce qui permet d'obtenir un léger mélange (voir figures 3.2.10. et 3.2.11.).
- Méthode de stockage en cône : stockage sans homogénéisation équipé de bras d'empilement à bande basculante sur stockage longitudinal. La récupération s'effectue à l'aide de récupérateurs à roue à godets.

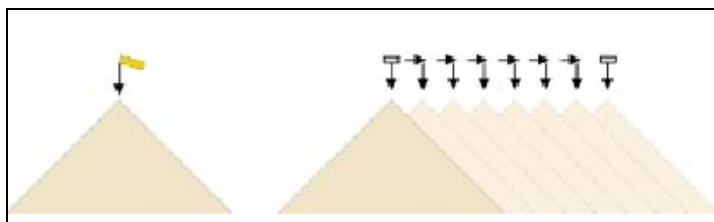


Figure 3.2.9. Méthode de stockage en cône.

Outre les méthodes automatiques mentionnées ci-dessus, il existe également des systèmes semi-automatiques de stockage :

- Stockage longitudinal et circulaire à l'aide de convoyeurs de déchargement par gravité ;
- Stockage par déplacement d'une grue sur la partie supérieure de la pile ;
- Stockage en silo par convoyeurs de déchargement par gravité ;

SYSTÈMES DE STOCKAGE SANS PRÉHOMOGÉNÉISATION



Figure 3.2.10. Méthode de stockage en strates.
Collecteur à portique.

- Disponible pour tous les types de matériaux, y compris les matériaux pâteux.
- Les matériaux peuvent être chargés ou récupérés sur des piles séparées.
- La capacité de stockage peut être augmentée.
- Faible coût initial.

SYSTÈMES DE STOCKAGE SANS PRÉHOMOGÉNÉISATION

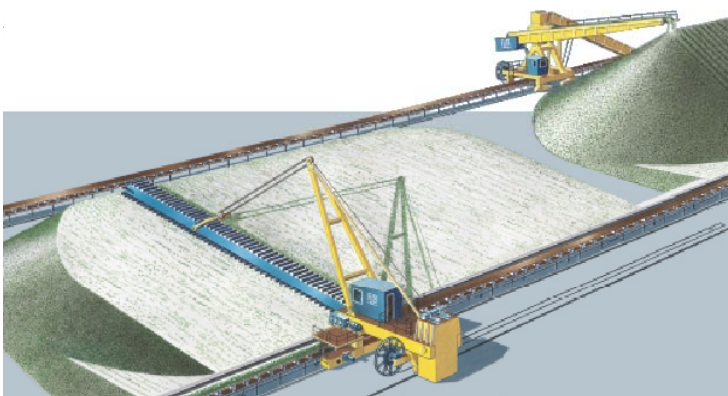
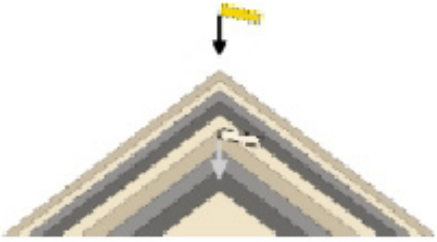




Figure 3.2.11. Méthode de stockage en strates.
Collecteur latéral.

- Disponible pour les matériaux pâteux.
- Les matériaux peuvent être chargés ou récupérés sur des piles séparées.
- La capacité de stockage peut être augmentée.

La préhomogénéisation est le mélange proportionnel des différents types de calcaire, d'argile ou de tout autre matériau la requérant. Comme nous l'avons déjà indiqué auparavant, elle est réalisée lorsque la qualité du matériau de la carrière est variable et il est possible d'obtenir une efficacité de mélange de 70 à 90 %.

		
<p>Figure 3.2.12. Méthode de stockage Chevron.</p>	<p>Figure 3.2.13. Méthode Chevron de stockage continu (Chevcon).</p>	<p>Figure 3.2.14. Méthode de stockage Windrow.</p>

- Méthode de stockage Chevron : méthode avec bras d'empilement et bandes basculantes de chargement sur systèmes de préhomogénéisation longitudinaux, et bras d'empilement sur systèmes de préhomogénéisation circulaires. La récupération s'effectue à l'aide de collecteurs à portiques et de récupératrices à roue à godets.
- Méthode de stockage Chevron : méthode avec bras de chargement sur systèmes de préhomogénéisation circulaire pour stockages continus. La récupération s'effectue à l'aide de collecteurs à portiques et de récupératrices à roue à godets.
- Méthode de stockage Windrow : avec collecteurs à portiques sur systèmes de stockage avec préhomogénéisation en fosse pour les matériaux pâteux, et avec bras de chargement rotatifs sur systèmes de préhomogénéisation. La récupération s'effectue à l'aide de collecteurs à portiques et de récupératrices à roue à godets.

SYSTÈMES DE STOCKAGE AVEC PRÉHOMOGÉNÉISATION

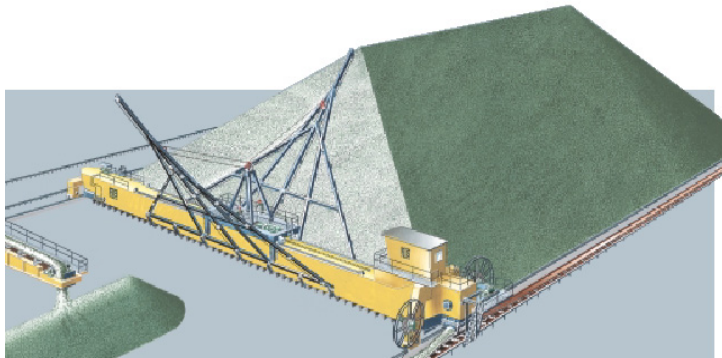


Figure 3.2.15. Méthode Chevron avec système de préhomogénéisation longitudinale.

- Disponible pour matériaux secs à légèrement pâteux.
- Ajustement efficace de grandes variations dans la composition des matériaux.
- La capacité de stockage est facile à augmenter.

SYSTÈMES DE STOCKAGE AVEC PRÉHOMOGÉNÉISATION

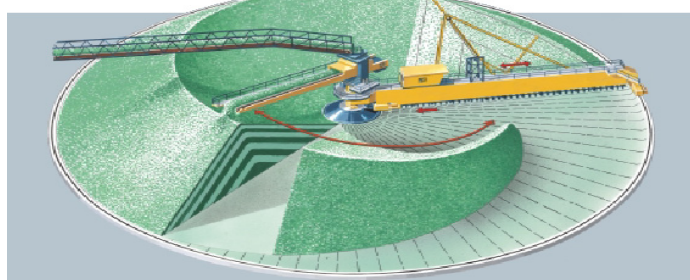


Figure 3.2.16. Méthode Chevcon avec système de préhomogénéisation pour stockages continus.

- Bon effet d'homogénéisation en continu.
- Il n'y a pas de problèmes de fins de cône.
- Utilisation optimale de l'espace.
- Opération continue totalement automatique.

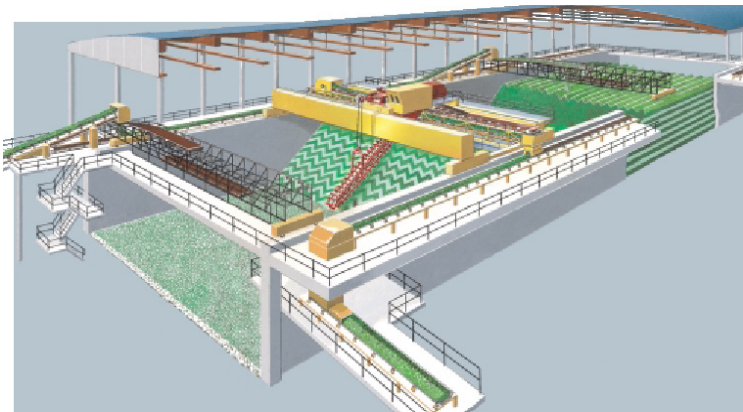


Figure 3.2.17. Méthode Windrow avec système de préhomogénéisation en fosse.

- Système de stockage uniquement pour matériaux très visqueux.
- Système économique pour grands stockages conçus pour l'alimentation directe de tous types de broyeurs.
- Utilisation optimale de l'espace.

3.2.2.2. Broyage du cru

Le cru est broyé en dosant les matières premières dans des proportions précises afin d'obtenir la farine crue formulée avec la dispersion la plus réduite possible, car l'alimentation d'un four en matières premières doit être la plus homogène possible du point de vue de leur composition chimique. Ceci est possible en contrôlant l'alimentation de l'installation de broyage de cru en portant une attention particulière à sa composition chimique et à une finesse appropriée.

Pour obtenir un cru d'une composition chimique homogène, il est donc très important que les matières premières qui alimentent le broyeur soient pesées et dosées avec la plus grande exactitude possible : c'est une opération essentielle pour garantir un bon fonctionnement du four et pour obtenir un clinker de haute qualité. La pesée et le dosage constituent en outre des facteurs importants du point de vue du rendement énergétique du système de broyage.

L'équipement de pesage et de dosage le plus communément utilisé dans l'alimentation des broyeurs en matières premières se compose de trémies intermédiaires par produit, remplies depuis le parc de matières premières ou par alimentation extérieure, et d'un système d'extraction des trémies avec des balances doseuses et un convoyeur à bande pour introduire le matériau dans le broyeur.

Dans les procédés par voie sèche et semi-sèche, les matières premières sont séchées et broyées dans des proportions définies et bien contrôlées, à l'intérieur d'un broyeur pour produire un cru sec. Dans les procédés par voie humide et semi-humide, les matières premières forment une pâte qui, broyée avec de l'eau, produit un lait.

Le cru à sa sortie du procédé de broyage doit ensuite être mélangé et homogénéisé pour garantir une composition optimale avant d'être envoyé au four.

En fonction du procédé technologique appliqué, d'autres opérations supplémentaires peuvent être nécessaires, comme par exemple la préparation du cru en granules secs (procédé par voie semi-sèche) ou en un cru filtré, en séchant partiellement le mélange dans les presses à filtre (procédé par voie semi-humide).

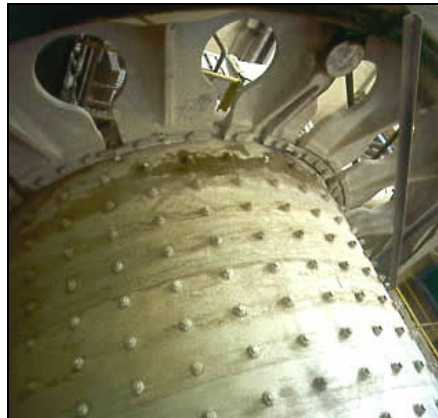


Figure 3.2.18. Broyage de farine crue.

Les matières premières, de même que les composants correcteurs si ces derniers sont nécessaires, sont broyées dans des proportions contrôlées et mélangées ensemble pour produire un mélange homogène possédant la composition chimique requise.

Pour les systèmes de four sec et semi-sec, les matières premières, d'une humidité d'environ 8 à 12 %, sont broyées et séchées jusqu'à l'obtention d'une poudre fine. En fonction de la construction du broyeur, la matière première peut être séchée en utilisant principalement les gaz de sortie chauds du four et/ou l'air de sortie du refroidisseur de clinker. Pour les matières premières à haute teneur en humidité, et dans les opérations de démarrage, un foyer auxiliaire peut s'avérer nécessaire pour

produire une chaleur additionnelle. La teneur en eau résiduelle du cru d'alimentation doit être inférieure à 0,5 %.

Les systèmes de broyage par voie sèche les plus usuels dans les pays du plan d'action pour la Méditerranée sont les suivants :

- Broyeur à boulets avec déchargement central ;
- Broyeur à boulets, balayage par air ;
- Broyeur vertical à cylindres ;
- Broyeur horizontal à cylindres ;
 - La capacité de séchage est limitée à environ 5 % d'humidité ;
 - Il n'existe jusqu'à présent que quelques installations.

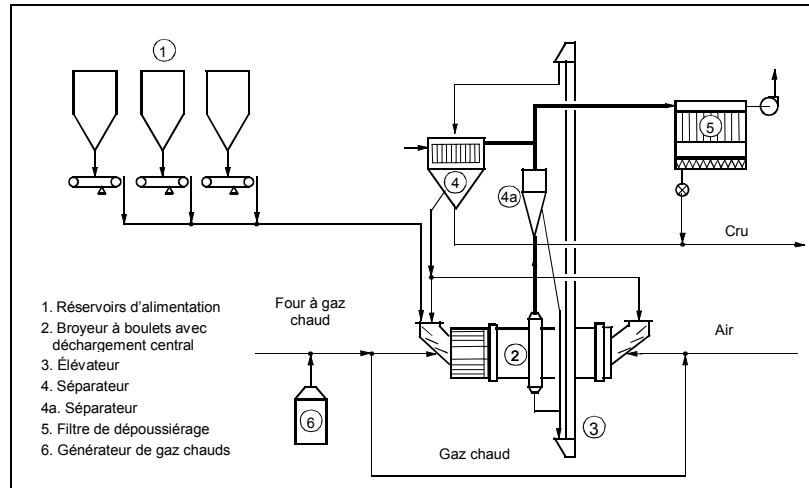
Les autres systèmes de broyage par voie sèche sont moins fréquemment employés :

- Broyeur à boulets avec déchargement final en circuit fermé ;
 - Limitation de la capacité de séchage à 6 % (en utilisant les gaz de combustion du four) ;
 - Limitation de la capacité de production à 300 t/h ;
 - Consommation d'énergie électrique moyenne ;
- Broyeur en circuit ouvert ;
- Presse à cylindres, avec ou sans sécheur concasseur ;
 - Capacité de séchage sans sécheur concasseur limitée à 5 % d'humidité (en utilisant les gaz de combustion du four) ;
 - La capacité de production est limitée à environ 200 t/h par unité.

La finesse et la distribution granulométrique des particules de cru à leur sortie du système de broyage revêtent une grande importance pour le procédé de calcination qui suit.

Le modèle établi pour ces paramètres est atteint en réglant le séparateur employé pour le tri du produit qui sort du broyeur. Les systèmes de broyage par voie sèche sont équipés de séparateurs à air et fonctionnent en circuit fermé. Les portions épaisses séparées des matières premières sont réintroduites dans le circuit.

Les broyeurs à cylindres consomment moins d'énergie et possèdent une capacité de séchage supérieure à celle des broyeurs à boulets, mais ils ne sont pas recommandés pour les matériaux très abrasifs. Le diamètre des broyeurs à boulets peut aller jusqu'à 6 m et leur capacité jusqu'à 400 t/h, leur consommation énergétique étant de l'ordre de 12 à 16 kWh/t. Les broyeurs à cylindres sont construits avec des capacités de traitement allant jusqu'à 400 t/h et leur consommation énergétique spécifique est inférieure, de l'ordre de 10 à 14 kWh/t, puisqu'ils fonctionnent à des pressions plus élevées et exigent une alimentation avec une teneur en eau relativement plus faible.



Source : Cembureau

Figure 3.2.19. Broyage de cru avec broyeur à boulets à déchargement central.

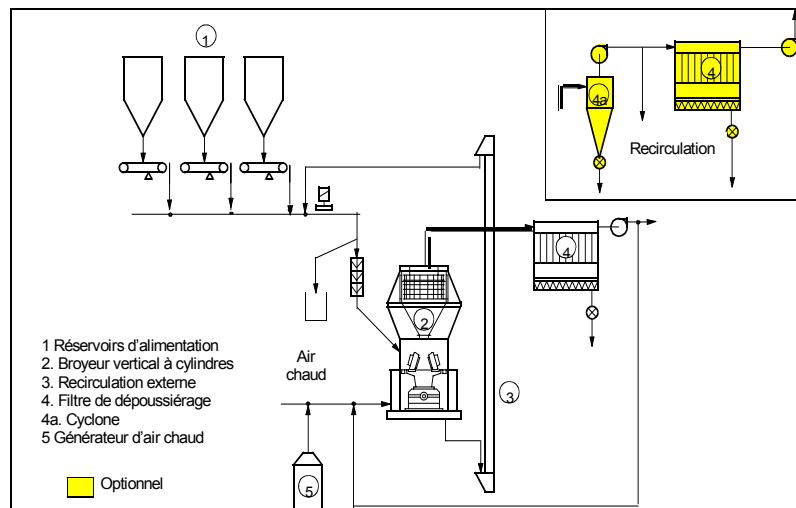


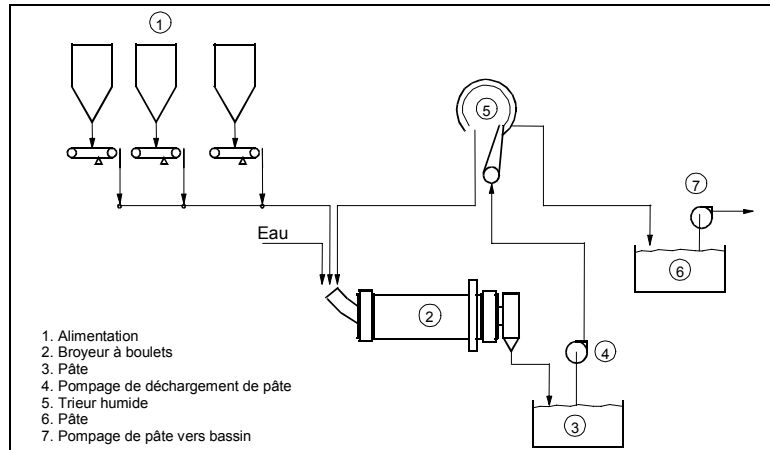
Figure 3.2.20. Broyage de cru avec broyeur vertical à cylindres.

Broyage de matières premières dans les systèmes par voie humide et semi-humide

Les fours à voie humide ou semi-humide ont recours au broyage humide. Le mélange de matières premières est broyé dans un broyeur laveur ou broyeur à boulets en y ajoutant de l'eau pour produire une pâte. Tout particulièrement s'il est nécessaire d'ajouter du sable comme matière première secondaire, le matériau doit passer par un broyeur à boulets. Pour obtenir la finesse de pâte requise, répondant aux critères de qualité, ce sont généralement les systèmes de broyage en circuit fermé qui sont utilisés.

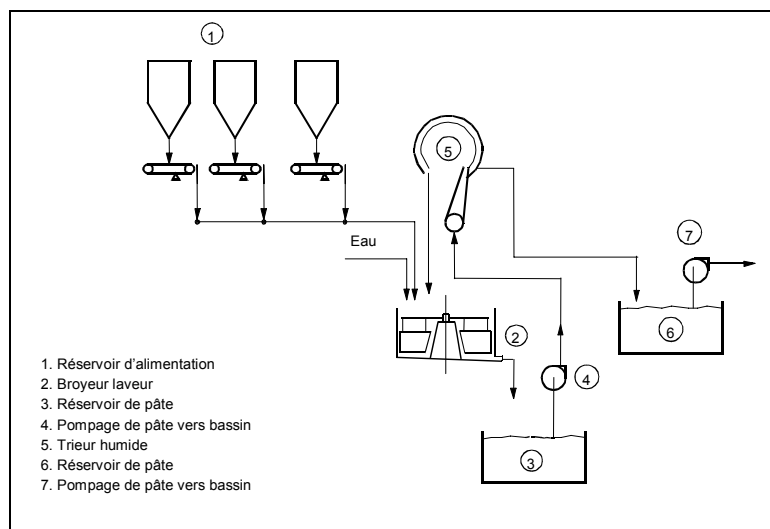
Le procédé par voie humide est particulièrement efficace lorsque les matières premières contiennent plus de 20 % d'eau.

Afin de réduire la consommation de combustible, l'ajout d'eau dans le mélange de la matière première doit être contrôlé de manière à ce que son volume soit le minimum nécessaire pour permettre d'obtenir le flux requis et les caractéristiques nécessaires de la pâte pour son pompage.



Source : Cembureau

Figure 3.2.21. Broyage de cru humide par broyeur à boulets en circuit fermé.



Source : Cembureau

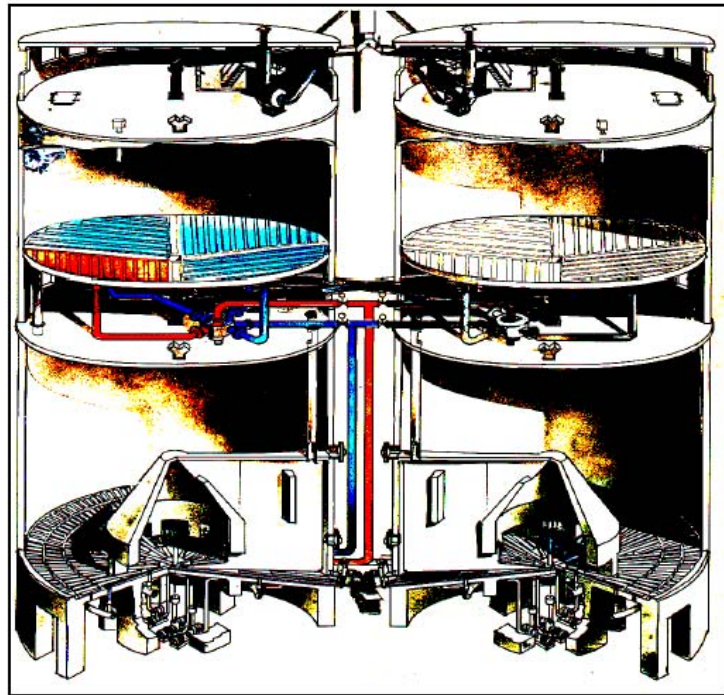
Figure 3.2.22. Broyage de cru humide par laveur en circuit fermé.

3.2.2.3. Homogénéisation du cru

Le cru résultant du broyage, ou la pâte dans le procédé par voie humide, doit faire l'objet d'un mélange et d'une homogénéisation supplémentaire pour obtenir la composition requise du mélange avant d'alimenter le four.

Système d'homogénéisation par charges (BHS)

L'homogénéisation du cru par charges (*BHS*, sigle anglais de « *Batch Type Homogenising Systems* ») s'effectue normalement dans deux silos et le stockage dans un seul. Les silos d'homogénéisation se trouvent habituellement au dessus des silos de stockage, de manière à permettre le déchargement du cru homogénéisé par gravité. L'homogénéisation s'obtient en aérant les silos pendant environ deux heures. L'effet de mélange dépasse 10:1.



Source : Cembureau

Figure 3.2.23. Silos d'homogénéisation et stockage du cru.

Système d'homogénéisation en continu (CHS)

Le système d'homogénéisation en continu (CHS, sigle anglais de « *Continuous Homogenising Silo System* ») consiste en un silo d'homogénéisation, normalement situé au dessus du silo de stockage. Le déchargement du cru par débordement est continu. L'effet d'homogénéisation peut atteindre jusqu'à 10:1.

Système de mélange et de stockage en continu (CBS)

Le silo de mélange continu (CBS, sigle anglais de « *Continuous Blending and Storage Silo* ») s'utilise simultanément pour le mélange du cru tout comme pour son stockage. Le mélange s'effectue via un effet de formation de conduits sectionnels. L'effet de mélange est de 5:1.

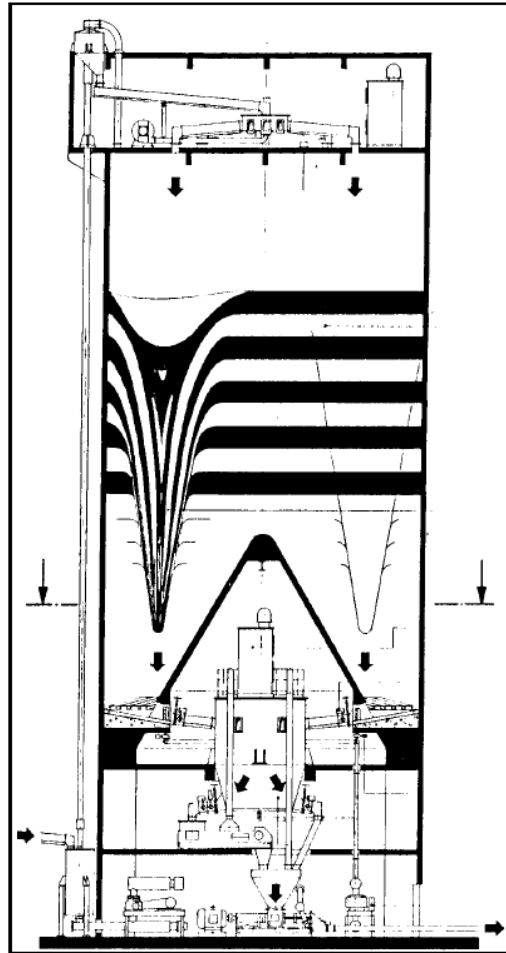


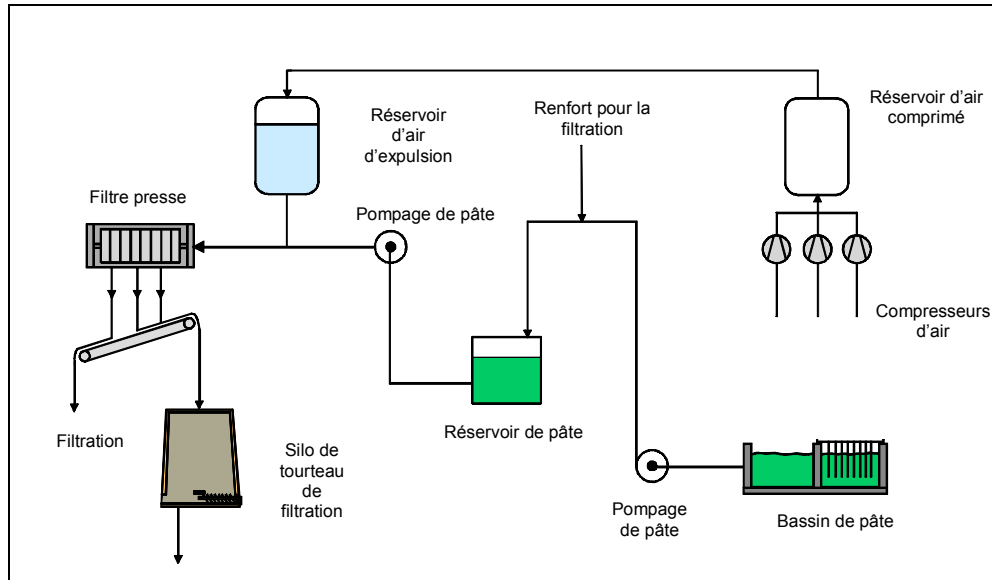
Figure 3.2.24. Système de mélange continu (CBS).

Mélange / homogénéisation et stockage de la pâte en bassins ou silos (SBHB)

Pour le mélange et l'homogénéisation de la pâte, il n'est possible d'utiliser que des systèmes fonctionnant par mise en charge. Le mélange et l'homogénéisation de la pâte peut être effectué aussi bien dans des silos que dans des bassins (SBHB, sigle de l'anglais *Slurry Blending/Homogenising and Storage in Basins or Silos*). L'effet de mélange et d'homogénéisation dans le silo se produit en insufflant des volumes élevés d'air comprimé dans la pâte, au moins à quatre emplacements. Dans les bassins, cet effet se produit à l'aide d'agitateurs rotatifs. Par ailleurs, de l'air comprimé est insufflé dans les bassins.

3.2.2.4. Exigences spéciales du procédé par voie semi-humide

Comme déjà indiqué auparavant, dans les installations modernes, la pâte obtenue dans le procédé par voie semi-humide est filtrée dans un filtre presse et passe par un équipement de séchage, de manière à pouvoir obtenir un cru sec pour alimenter le four.



Source : Cembureau

Figure 3.2.25. Filtre presse pour pâte dans le procédé par voie humide.

Le procédé de filtration a pour but de remplacer la consommation d'énergie purement thermique du procédé de séchage, comme dans le cas dans les fours humides, par des procédés de filtration mécanique beaucoup plus économiques que les filtres presses.

La filtration permet normalement d'éliminer 2/3 du contenu d'eau de la pâte : on filtre par exemple 36 % de mélange de pâte à 0,87 kg d'eau par kg de clinker pour aboutir à 18 % de mélange dans le tourteau de filtration contenant ainsi environ 0,34 kg d'eau par kg de clinker.

Égouttement de la pâte dans un filtre presse

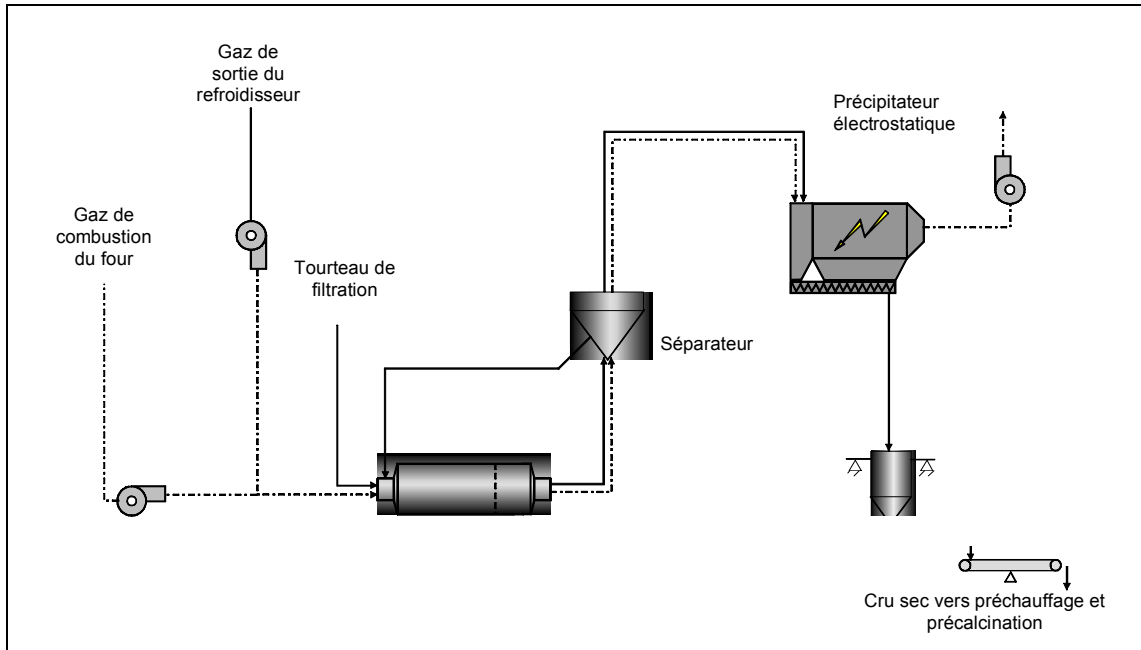
La pression de filtration des filtres presses d'égouttement de pâte est de l'ordre de 15 à 20 bar, et les temps de rétention sont de 15 à 35 minutes, les temps de chargement et de déchargement de la presse étant de 10 minutes.

Séchage du tourteau de filtration

On utilise pour l'essentiel deux types de séchage du tourteau de filtration :

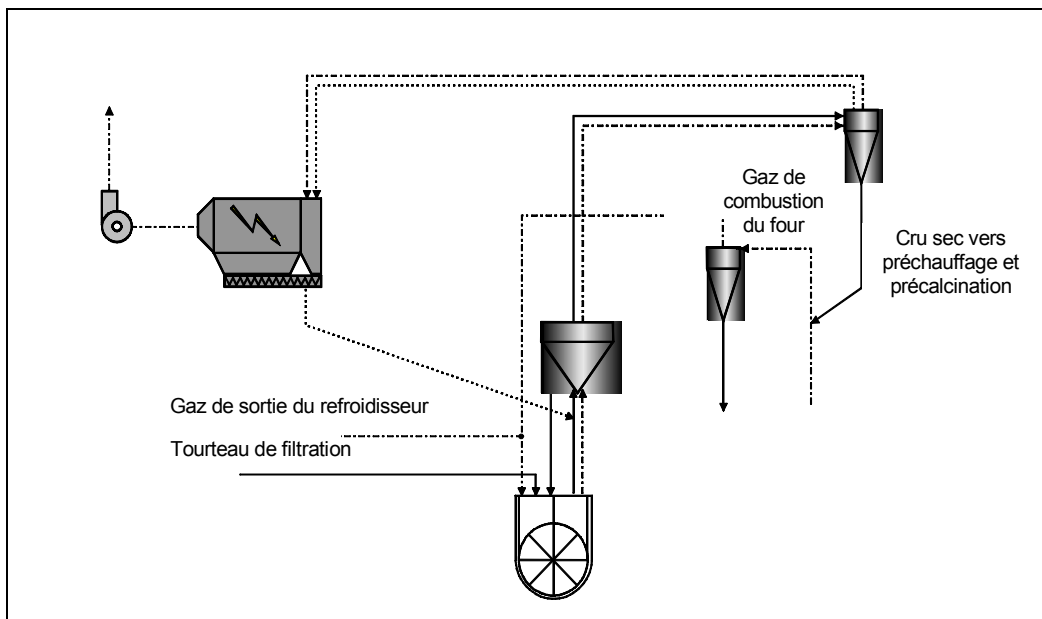
- Sécheurs à dispersion ou rotatifs ;
- Combinaison de concasseurs / sécheurs.

Les gaz de combustion du four et du refroidisseur de clinker sont utilisés pour le séchage du tourteau.



Source : Cembureau

Figure 3.2.26. Sécheur rapide à rotation et dispersion pour le tourteau de filtrage.



Source : Cembureau

Figure 3.2.27. Combinaison de sécheur rapide/concasseur pour le séchage du tourteau de filtrage.

3.2.3. Stockage et préparation des combustibles

Les cimenteries nécessitent de grandes quantités d'énergie pour la calcination des matières premières dans les fours. Cette énergie est fournie par le combustible et constitue le coût économique le plus important de la fabrication de ciment.

Divers combustibles peuvent être employés pour fournir l'énergie thermique nécessaire au procédé. De nos jours, ce sont principalement deux types différents de combustibles qui sont utilisés pour chauffer le four à ciment :

- Coke de pétrole et/ou charbon pulvérisé ;
- Fuel lourd.

L'emploi de gaz naturel ou de fuel lourd est normalement empêché par leur coût élevé, mais le choix du combustible dépend en grande mesure de la situation locale.

Les hautes températures et les temps de séjour prolongés des gaz dans le four représentent un potentiel considérable de destruction des composés organiques. Ceci permet d'employer des déchets d'autres procédés de production comme combustibles alternatifs (voir section 3.2.3.3. *Emploi de déchets comme combustibles alternatifs*).

Dans le cas de la fabrication du ciment blanc, le choix des combustibles doit être fait avec un soin particulier pour éviter les éléments susceptibles d'altérer la couleur du produit final, et par conséquent, il n'est généralement pas possible d'employer les combustibles alternatifs mentionnés auparavant.

3.2.3.1. Stockage de combustibles

Coke de pétrole et charbon

Le charbon et le coke de pétrole s'entreposent d'une manière similaire à celle des matières premières, dans de nombreux cas dans des entrepôts couverts. Pour les stockages de longue durée, on a recours à de grands tas compacts et extérieurs à ciel ouvert. Ces tas doivent être traités de manière à éviter l'érosion produite par l'eau et le vent, par arrosage asphaltique, arrosage à l'eau et aux matières tensioactives, en les recouvrant d'herbe, etc. S'il existe un sol en béton sous les tas empilés, l'eau drainée peut être collectée et épurée.

En cas de stockage de charbon à teneur relativement élevée en matières volatiles, il est nécessaire de respecter une bonne pratique en termes de compactage et de hauteur des piles, de manière à éviter le risque d'ignition spontanée si le matériau est entreposé pendant de longues périodes.

Le charbon et le coke de pétrole pulvérisés s'entreposent exclusivement dans des silos. Pour des raisons de sécurité (risque d'auto-inflammation ou d'explosions dus à l'électricité statique), ces silos doivent posséder des dispositifs de sécurité. Dans la plupart des cas, ils sont équipés de valves anti-explosion et de systèmes d'inertisation au CO₂ ou à l'azote.

Fuel lourd

Le fuel lourd s'entrepose dans des réservoirs en acier. Le transvasement du fuel lourd nécessite son chauffage préalable à une température de l'ordre de 80 °C pour augmenter sa fluidité. On utilise pour ce faire des systèmes de chauffage à la vapeur ou avec de l'huile thermique, tout en calorifugeant les conduites.

3.2.3.2. Préparation des combustibles

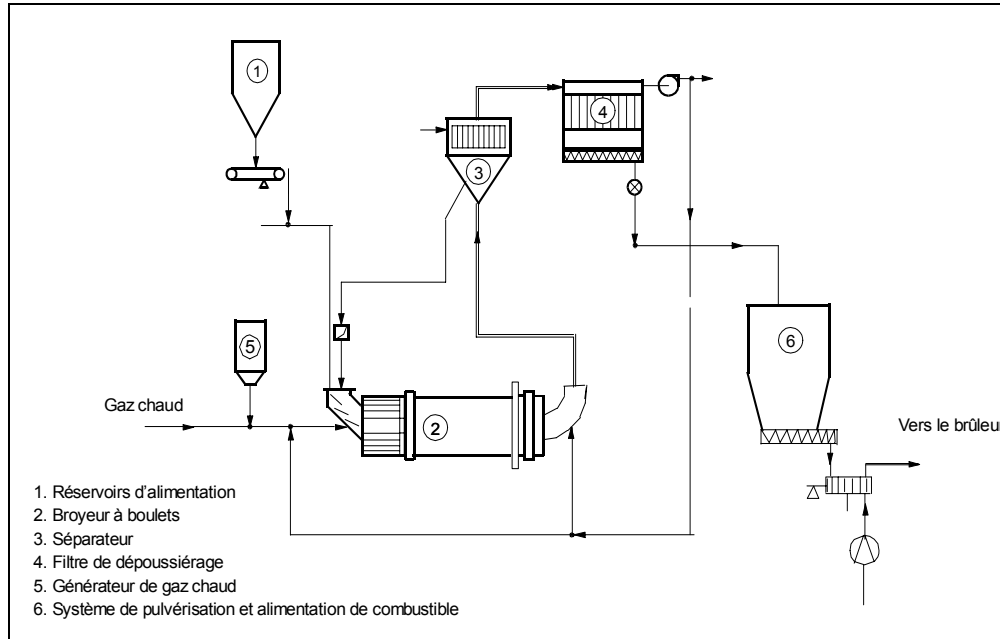
La nature physique des combustibles employés dans une usine de ciment – solide, liquide ou gazeuse – détermine, en plus de la conception des systèmes de stockage, la préparation et la combustion – aussi bien pour les combustibles fossiles conventionnels que pour les combustibles alternatifs.

Les combustibles liquides ne nécessitent normalement aucun conditionnement, tandis que les combustibles solides exigent une préparation coûteuse (concassage, broyage et séchage), qui s'effectue normalement à l'usine elle-même. Dans tous les cas, les systèmes de préparation, de stockage et de combustion des combustibles doivent être conçus et exploités avec un niveau élevé de sécurité pour réduire les risques d'incendie et d'explosion.

Coke de pétrole et charbon

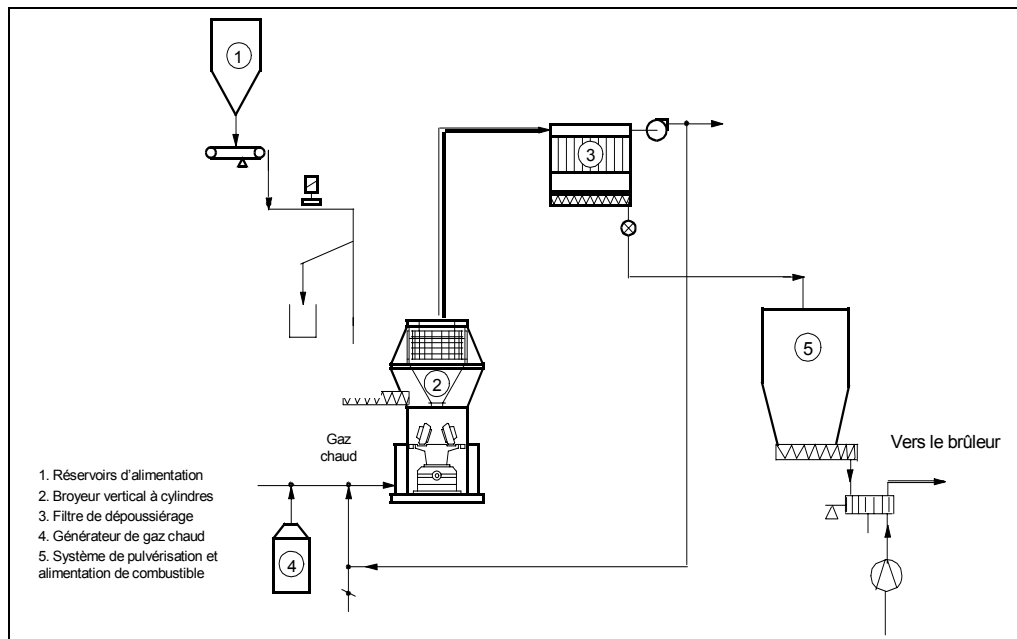
Le concassage et le broyage de combustibles s'effectuent principalement selon trois systèmes :

- Broyeur à boulets, balayage par air ;
- Broyeur à cylindres vertical ;
- Broyeur à impacts.



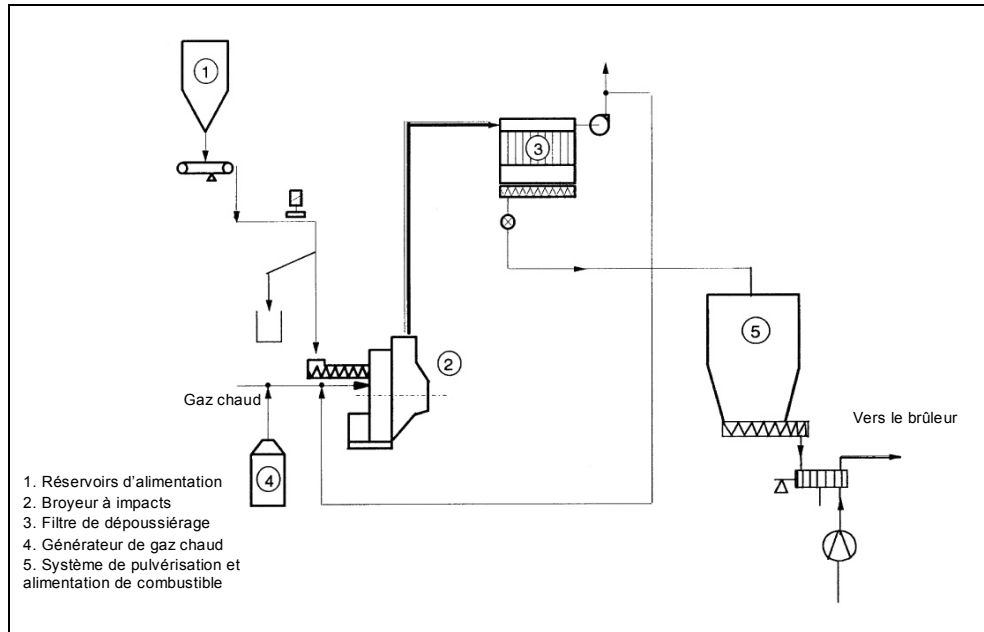
Source : Cembureau

Figure 3.2.28. Broyage de combustible par broyeur à boulets.



Source : Cembureau

Figure 3.2.29. Broyage de combustible par broyeur vertical à cylindres.



Source : Cembureau

Figure 3.2.30. Broyage de combustible par broyeur à impacts.

La finesse du combustible pulvérisé est très importante. Si ce dernier est excessivement fin, les températures de la flamme risquent d'être trop élevées. S'il est trop grossier, une mauvaise combustion peut se produire. Le combustible pulvérisé peut être envoyé directement au brûleur (sans stockage ni mesures intermédiaires) ou, ce qui se fait communément de nos jours, il peut être entreposé dans des silos à charbon équipés de systèmes de mesure et d'alimentation appropriés.

L'alimentation en charbon et en coke de pétrole peut être directe ou indirecte. En cas d'injection directe, le stockage de combustible broyé n'est pas nécessaire. Le combustible pulvérisé est injecté directement à l'intérieur du four par l'air de balayage du broyeur, qui agit comme agent de transport et comme air primaire. Les installations d'alimentation directe présentent un grand nombre d'inconvénients : les pertes de chaleur du four, entre autres, sont de l'ordre de 200 à 250 MJ/tonne de clinker (soit 6 à 8 % plus élevées que celles des systèmes de four modernes). Par conséquent, l'injection directe n'est normalement pas utilisée de nos jours.

Fuel lourd

En cas d'utilisation de fuel lourd, pour favoriser sa manipulation et combustion, ce produit est chauffé à une température de 120 à 140 °C, ce qui réduit sa viscosité à 10 à 20 cSt. La pression est en outre augmentée à 20 à 40 bar. Le fuel lourd, à une viscosité et une pression adéquates, est injecté dans le four à travers une buse de pulvérisation.

3.2.3.3. Emploi de déchets comme combustibles alternatifs

Les hautes températures à l'intérieur des fours et les séjours prolongés inhérents au processus de fabrication du ciment constituent un potentiel élevé de destruction de composés organiques, ce qui permet d'utiliser une grande variété de combustibles, sous-produits d'autres procédés industriels ou dérivés de déchets, aussi bien liquides (huiles usagées, solvants, déchets de distillation, etc.) que solides (pneus usagés, déchets de bois, papier, carton, boues urbaines et industrielles, etc.).

Les incinérateurs de déchets fonctionnent normalement à 1 100 °C avec un temps de rétention des gaz de 2 secondes, pour pouvoir parvenir à une destruction de 99,99 % des déchets incinérés. Dans le cas des fours à ciment :

- Les gaz de combustion y réalisent des séjours plus prolongés, à une température très élevée (jusqu'à 2 000 °C) et dans une atmosphère riche en oxygène, le four à clinker étant par conséquent considéré comme le système le plus efficace pour la destruction complète des composés organiques présents dans les déchets ;
- Le pouvoir calorifique du flux de déchets est utilisé comme combustible tandis que, en même temps, on parvient à la destruction totale du matériau ;
- L'interaction des gaz de combustion avec la matière première présente dans le four fait que les gaz acides (sulfureux et halogénés) résultant de la combustion sont neutralisés et que la partie minérale non combustible du déchet est retenue dans la structure du clinker d'une manière irréversible.

Les avantages de l'utilisation de combustibles alternatifs dans les fours à clinker peuvent en outre être résumés de la manière suivante :

- Elle évite le rejet de ces déchets et les impacts associés ;
- Ce traitement écologique et sûr des déchets tire le meilleur parti de leur énergie et de leurs minéraux sans provoquer d'impacts additionnels sur l'environnement ;
- Elle permet une économie de combustibles fossiles non renouvelables (charbon et dérivés du pétrole) ;
- Elle réduit globalement les émissions, en particulier de CO₂ (un des gaz responsables de l'effet de serre) en remplaçant les combustibles fossiles par des matériaux qui auraient été incinérés ou auraient fermenté dans des décharges publiques, avec les émissions qui en résultent.
- Elle offre une alternative de gestion économique et flexible, car elle permet de recommencer à utiliser les combustibles fossiles lorsque les pratiques de réduction de déchets s'amélioreront.

C'est pour toutes ces raisons que l'emploi de combustibles alternatifs est une pratique habituelle dans la plupart des pays développés. La tendance du niveau de substitution est à la hausse.

Le tableau suivant donne des exemples de déchets utilisés comme combustibles alternatifs :

Tableau 3.2.3. Déchets en tant que combustibles alternatifs.

Combustibles liquides alternatifs
Dissolvants à faible teneur en chlore, lubrifiants tels que les huiles végétales et les graisses, déchets de distillation, huiles hydrauliques, huiles isolantes, etc.
Solides fins, granulés ou pulvérisés
Sciure, boues d'eaux noires, plastiques granulés, farine animale, déchets de l'agriculture, déchets de production de bois ou de pneumatiques, etc.
Solides épais
Pneumatiques, déchets de caoutchouc, déchets de plastique, déchets de bois, matière organique, etc.
Combustibles épais alternatifs
Pneumatiques entiers, balles de plastique, matériaux en sacs et tambours

Stockage des combustibles alternatifs

Le déchet est déchargé à l'usine en vue de son stockage temporaire, avec une capacité qui correspond normalement à plusieurs jours d'utilisation et visant à réguler de manière adéquate le flux de déchets vers le four.

Le type de stockage et les systèmes de chargement et de déchargement doivent être conçus de manière à garantir la sécurité, en prévoyant des systèmes de protection contre les incendies et des moyens de protection contre les rejets des déchets dans le sol et dans l'eau.

Presque tous les combustibles alternatifs employés dans les cimenteries sont solides ou liquides, à l'exception de certains cas dans lesquels des gaz résiduels peuvent être utilisés. Les déchets liquides s'entreposent dans des réservoirs étanches, dûment équipés de leurs bacs de rétention contre les éventuelles pertes et fuites. Les déchets solides s'entreposent dans des magasins, dans des hangars ou dans des trémies.

Préparation des combustibles alternatifs

Les combustibles solides (pneumatiques, papier, plastique) sont soumis à des traitements en vue de l'adaptation de leurs tailles par concassage ou découpe, afin d'adapter le déchet aux installations de stockage, de manipulation et de combustion de l'usine de ciment.

La plus grande partie du combustible qui alimente le four (65 à 85 %) doit être finement broyée, car elle doit brûler avec facilité et complètement, tandis que le reste (15 à 35 %) peut être introduit sans le pulvériser (comme par exemple les pneumatiques entiers ou en morceaux), en l'introduisant par différents endroits dans le brûleur.

La plupart des combustibles liquides (lubrifiants, dissolvants, etc.) peuvent être injectés dans le four avec leur composition originale, bien qu'ils soient normalement soumis à des procédés de mélange et d'homogénéisation dans des installations spécifiquement conçues à cet effet (installations de préparation de déchets), de manière à optimiser la combustion dans le four, du point de vue non seulement de l'exploitation de ce dernier, mais encore de son comportement environnemental.

Les installations de préparation de déchets sont normalement exploitées par des entreprises spécialisées en gestion de déchets, qui envoient à l'usine de ciment les déchets liquides préparés en fonction des spécifications concrètes correspondantes de chaque four.

3.2.4. Cuisson du clinker

Cette partie du processus est la plus importante du point de vue des émissions potentielles, de la qualité du produit et du coût. Le cru (ou farine), ou la pâte par voie humide, est acheminé au système de four où il est séché, préchauffé, calciné et fritté pour produire le clinker de ciment. Le clinker est refroidi à l'air, puis il est entreposé.

Dans le procédé de production du clinker (également appelé clinkérisation ou frittage), il est essentiel que les températures du matériau soient maintenues dans le four entre 1 400 et 1 500 °C, qui correspondent à des températures de flamme d'environ 2 000 °C. La réaction de clinkérisation se produit dans des conditions oxydantes, un excédent d'air étant par conséquent nécessaire dans la zone de clinkérisation du four.

La fabrication de clinker blanc fait exception aux deux caractéristiques mentionnées ci-dessus. D'une part, les matières premières ne contiennent pas de fondants, car ces derniers pourraient colorer le produit final, de sorte que les températures de clinkérisation sont de l'ordre de 1 600 °C, ce qui exige des températures de flamme supérieures à 2 000 °C. D'autre part, il est dans certains cas nécessaire de travailler dans des conditions réductrices, ce qui augmente la consommation d'énergie.

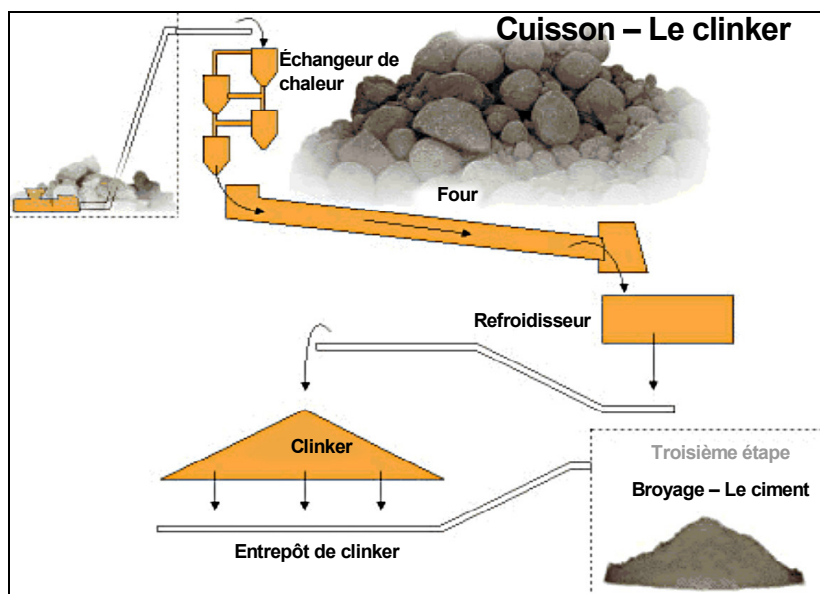


Figure 3.2.31. Étape de cuisson.

3.2.4.1. Composition du clinker

Le clinker se compose principalement de silicate tricalcique, de silicate dicalcique, d'aluminate tricalcique et d'aluminoferrite tétracalcique. Il est produit à partir d'un mélange de matières premières telles que la pierre calcaire, l'argile, le sable, le minerai de fer, la bauxite et d'autres composants dans des proportions définies. Lorsque ce mélange est chauffé à la gamme de températures de frittage, les nouveaux composés forment les différentes phases du clinker.

Le tableau 3.2.4. indique les proportions typiques du clinker. Les termes alite et bélite ont été introduits par le Suédois E. TORNEBOHM qui, en examinant le clinker au microscope en 1897, a utilisé les premières lettres de l'alphabet pour désigner les principaux composants car il ignorait leur composition. Ces noms sont encore utilisés pour faire une distinction entre les silicates purs et les phases du silicate dans le clinker, qui incorporent toujours de faibles quantités d'aluminium, de fer, de magnésium, de métaux alcalins, et des traces d'autres éléments.

Tableau 3.2.4. Composition du clinker.

CONSTITUANT	FORMULE CHIMIQUE	CONTENU (% de poids)	
		Plage	Moyenne
Silicate tricalcique	$3 \text{ CaO SiO}_2(\text{C}_3\text{S})$	46 – 79	61
Silicate dicalcique	$2 \text{ CaO SiO}_2(\text{C}_2\text{S})$	5 – 30	15
Aluminoferrite de calcium	$2 \text{ CaO (Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)[\text{C}_2(\text{A},\text{F})]$	4 – 16	8
Aluminate tricalcique	$3 \text{ CaO Al}_2\text{O}_3(\text{C}_3\text{A})$	6 – 18	12
Oxyde de calcium libre	CaO (C)	0,1 – 4	
Oxyde de magnésium	MgO (M)	0,7 – 1,5	1,5

Source : Ullmann's

Silicate tricalcique (C₃S)

Il s'agit du composé dont la teneur en CaO est la plus élevée sur le système binaire CaO-SiO₂. C₃S. Il est décisif et détermine la plupart des caractéristiques du ciment. Sa prise est lente et le durcissement est

assez rapide. Il atteint une résistance très élevée lorsqu'il est broyé et mélangé à de l'eau : c'est pourquoi il apparaît souvent dans les ciments à durcissement rapide et dans ceux à hautes résistances initiales.

Il se forme suite à la réaction à l'état solide entre l'oxyde de calcium et le silicium, et peut être produit à partir de pierre calcaire et de quartz pur, très finement broyés puis calcinés à une température extrêmement élevée. La cinétique de la réaction est plus élevée en présence de calcium, d'aluminium et d'oxydes de fer (III) à une température de 1 450 °C environ. C'est la raison pour laquelle les matières premières employées dans la production du clinker contiennent comme constituant prédominant l'oxyde de calcium et la silice, ainsi que les quantités nécessaires d'aluminium et d'oxyde de fer (III) pour produire une proportion du mélange d'environ 20 à 25 %.

Le C_3S présente une chaleur de prise élevée, son pourcentage devant être réduit pour les grandes masses de béton, dans lequel cas le silicate dicalcique sera préféré.

Silicate dicalcique (C_2S)

Il s'agit du composé qui dote le ciment de sa résistance à long terme, car sa prise est lente, de même que son durcissement. Sa chaleur d'hydratation est la plus faible de celles des composants principaux et sa stabilité chimique est supérieure à celle du silicate tricalcique. C'est pourquoi les ciments à haute teneur en silicate dicalcique sont plus résistants aux sulfates que ceux à faible teneur.

De même que le silicate tricalcique, il se forme suite à la réaction entre l'oxyde de calcium et le silicium, lorsque le clinker du ciment ne se sature pas totalement avec l'oxyde de calcium. Dans les mélanges riches en chaux, le C_2S se forme à des températures inférieures à 1 000 °C en raison de la réaction à l'état solide. Pendant le procédé de frittage au-dessus de 1 250 °C, le C_2S incorpore un Ca^{2+} additionnel, ce qui donne lieu à la formation de C_3S .

Aluminate tricalcique (C_3A)

Il dote le ciment d'une chaleur d'hydratation très élevée, d'une vitesse de prise très rapide et d'un grand retrait et, bien que ses caractéristiques hydrauliques ne soient pas exceptionnelles, il améliore beaucoup, avec les silicates, la résistance initiale du ciment.

Sa stabilité chimique est bonne face à certaines eaux agressives (par exemple l'eau de mer) alors qu'elle est très faible face aux sulfates.

Il s'agit du composé dont la teneur en CaO est la plus élevée parmi les phases de l'aluminate. Le C_3A contient l'oxyde d'aluminium qui ne se combine pas en aluminoferrite calcique. Il fond en produisant de l'oxyde de calcium. Le C_3A pur se cristallise sous forme de cubes. La maille cristalline peut incorporer divers ions dans la solution solide, comme par exemple Fe_3^+ , Mg_2^+ , Si_4^+ , ou encore K^+ et Na^+ . En raison de l'incorporation de métaux alcalins, il se produit un changement de cristallisation de cubique à orthorhombique et monoclinique, cette cristallisation donnant une réactivité hydraulique plus élevée par rapport au C_3A cubique.

Aluminoferrite tétracalcique [$C_4(AF)$]

Ce composé n'intervient pas dans les résistances mécaniques, et sa présence se doit à la nécessité d'utiliser des fondants contenant du fer dans la fabrication du clinker. Il possède une faible chaleur d'hydratation et une grande vitesse de prise. Sa résistance aux eaux séléniteuses et aux éléments agressifs en général est la plus élevée de tous les constituants. Sa couleur foncée interdit son emploi pour les ciments blancs, dans la fabrication duquel d'autres fondants sont utilisés.

Dans le clinker du ciment commun, la composition de l'aluminoferrite de calcium correspond à la formule $4 CaO Al_2O_3 Fe_2O_3$. Elle peut contenir jusqu'à 2 % d'oxyde de magnésium dans sa maille cristalline, ce qui provoque un changement de couleur du marron au gris, la couleur du ciment commun.

Chaux libre (CaO) et périclase (MgO).

Les composants les moins importants du clinker du ciment sont l'oxyde de calcium libre (chaux libre) et l'oxyde de magnésium (périclase). Ils réagissent avec l'eau pour former de l'hydroxyde de calcium et de l'hydroxyde de magnésium, qui occupent davantage d'espace que les oxydes originaux. Par conséquent, l'oxyde de calcium libre et l'oxyde de magnésium peuvent provoquer une expansion lorsque les quantités contenues sont élevées. Dans ce cas, la réaction avec l'eau est très lente et se poursuit même lorsque le ciment a commencé à durcir.

Par conséquent, tous les standards relatifs au ciment tendent à limiter la teneur en CaO et en MgO de manière à empêcher l'expansion, qui nuirait au mortier et au béton (produits dérivés du ciment).

Composés de métaux alcalins

Il s'agit, par exemple, des sulfates et composés alcalins-métalliques qui contiennent de l'aluminate de calcium. Le clinker contient jusqu'à 2 % d'oxydes de métaux alcalins ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) et jusqu'à 2 % de sulfate (SO_4^{2-}). Les sulfates de métaux alcalins se forment aux températures de frittage. Ils ne se mélangent pas à l'aluminoferrite dans le clinker. Les solutions solides de sulfate alcalin-métallique se cristallisent pendant le refroidissement avec une composition qui dépend du rapport $\text{KO}/\text{Na}_2\text{O}$. La quantité totale de métaux alcalins et la nature de leur union dans le clinker peuvent affecter de façon perceptible le procédé de durcissement et les propriétés mécaniques du ciment.

Autres composants

Les autres composants qui peuvent être trouvés dans le clinker du ciment portland commun n'ont aucune influence significative sur les propriétés du ciment. Les ciments spéciaux peuvent contenir des aluminates calciques dans différentes proportions, qui déterminent les propriétés finales du produit.

3.2.4.2. Procédé de cuisson du clinker

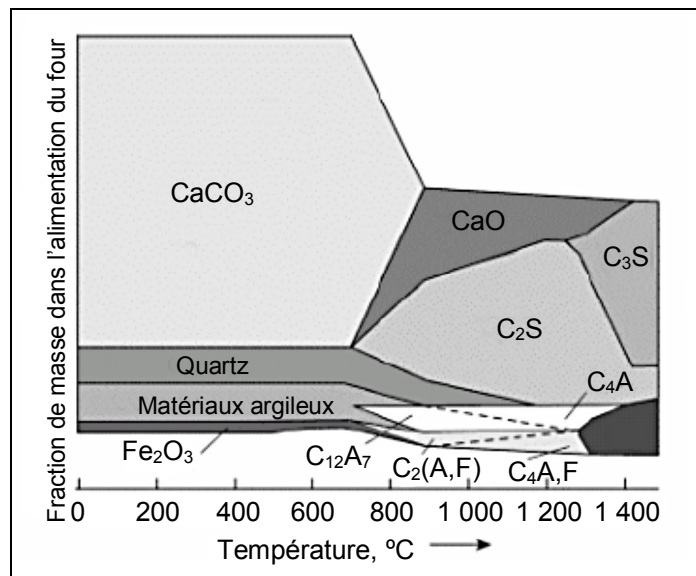
Dans cette phase du processus, la plus importante du point de vue de la qualité du produit, du potentiel d'émissions et du coût, les matières premières sont acheminées au four, où elles sont séchées, préchauffées, calcinées et frittées pour produire le clinker de ciment, immédiatement refroidi par air et entreposé.

La cuisson consiste en une réaction entre solides finement divisés (très lente) et la formation d'une phase liquide, qui accélère les réactions et le développement des nouveaux composants (voir figure 3.2.32). Dans le four, le cru acquiert peu à peu une température de plus en plus haute, ce qui donne lieu à la production d'un certain nombre de transformations physiques et chimiques. Conventionnellement, ce procédé se subdivise en trois phases :

- I. **Composition initiale (20 °C) :** calcite (CaCO_3), quartz (SiO_2), minerais d'argile (SiO_2 - Al_2O_3 - H_2O) et composants de fer (Fe_2O_3).
- II. **Séchage et préchauffage (20 à 700 °C) :** le séchage implique l'évaporation de l'humidité de la matière première à une température de 110 °C. Lors du chauffage initial, il se produit l'évaporation de l'eau liquide retenue et de celle d'absorption, suivie par la déshydratation, à des températures supérieures à 450 °C, des minéraux d'argile, et l'activation d'oxydes par la décomposition de ces minéraux.
- III. **Préchauffage et calcination (700 à 1 000 °C) :** le procédé de dissociation des carbonates de calcium et de magnésium se termine et une quantité considérable d'oxyde de calcium libre fait son apparition. Il se produit de même une décomposition des minéraux argileux déshydratés dans les oxydes SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 . Les oxydes de fer commencent à réagir avec la chaux et l'alumine pour former de l'aluminoferrite tétracalcique liquide à 1 300 °C, température à laquelle les minéraux se dissolvent, en augmentant la réaction entre eux. Le résultat de ces

réactions est la première formation des phases du clinker qui se déroulent à l'état solide, C_3A , CA , $C_2(A,F)$, $C_{12}A_7$, et en partie C_2S .

- IV. **Cuisson (900 à 1 250 °C)** : jusqu'à présent, toutes les réactions ont été endothermiques. Au cours de cette phase se produisent les réactions de phase solide. À 1 338 °C, les matériaux dissous dans l'aluminoferrite tétracalcique (C_4AF) réagissent en formant tout le silicate dicalcique (C_2S) et la formation initiale du fondu C_3A . Ces réactions sont exothermiques, ce qui provoque une augmentation intense de la température dans une section relativement courte du four.
- V. **Cuisson (1 250 à 1 450 °C)** : l'aluminate tricalcique (C_3A) achève de se former à 1 400 °C. La chaux excédentaire réagit avec une partie du silicate dicalcique (C_2S) pour former du silicate tricalcique (C_3S).
- VI. **Refroidissement** : le refroidissement du clinker commence dans la zone de pré-refroidissement du four. La longueur de cette zone et la vitesse de refroidissement dépendent de divers facteurs, comme par exemple la position du brûleur primaire et le type de refroidisseur. Le clinker sort du four à des températures allant de 1 350 °C (zone de frittage proche de la sortie du four) à 1 150 °C (zone de refroidissement avec refroidisseurs à satellites). L'optimisation du refroidissement par le biais de nouvelles techniques améliore l'efficacité globale du système de cuisson au four. Le clinker et les caractéristiques du ciment peuvent en outre être affectés positivement par une grande vitesse de refroidissement, en particulier dans la zone de pré-refroidissement du four. Pendant cette phase se forment complètement la structure et la composition définitive du clinker, dans laquelle figurent C_3S , C_2S , C_3A , $C_4(AF)$, la phase vitreuse et les composants secondaires.



Source : Ullmann's

Figure 3.2.32. Composition dans le four en fonction de la température.

Dans le procédé de clinkérisation, la charge du four doit atteindre des températures de 1 400 à 1 500 °C, avec une température de pointe des gaz de 2 000 °C. Le procédé doit s'effectuer dans des conditions oxydantes, ce qui nécessite un excédent d'air dans la zone de frittage ; ces conditions sont nécessaires pour la formation des phases du clinker et pour la qualité du ciment final.

Du point de vue des procédés physiques et chimiques, le procédé de cuisson se subdivise habituellement en cinq étapes :

- I. Séchage.

- II. Préchauffage (jusqu'à 500 °C).
- III. Décarbonatation ou précalcination (700 à 1 000 °C)
- IV. Clinkérisation (1 000-1 450 °C)
- V. Refroidissement (1 450 à 80 °C)

3.2.4.3. Fours rotatifs

Depuis son apparition en 1895, le four rotatif est devenu le cœur des installations modernes de production de ciment. Les premiers fours rotatifs étaient longs (valeurs L/D jusqu'à 35/40) et ont évolué jusqu'aux fours modernes (de valeurs L/D³ 10). Le four vertical est encore utilisé de nos jours pour la production de chaux, mais ce n'est que dans un nombre très réduit de pays qu'il est employé pour la production de clinker de ciment, et dans ces cas il s'agit de petites installations.

Les systèmes de cuisson au four appliqués communément sont par conséquent des fours rotatifs, avec ou sans les systèmes additionnels qui seront abordés plus loin (préchauffage et précalcinateur), en fonction de la conception choisie pour le procédé principal.

Le four rotatif consiste en un cylindre métallique dont l'intérieur est revêtu de matériau réfractaire. Sa longueur peut dépasser les 150 mètres, et ses diamètres peuvent atteindre 4,5 mètres. Il est légèrement incliné (2 à 5 %) et tourne à une vitesse lente (100 à 180 tours par heure, en fonction de son diamètre et de son inclinaison). L'alimentation est continue et s'effectue par la partie supérieure, sous la forme de pâte lorsqu'il s'agit du procédé par voie humide, ou sous la forme de poudre sèche s'il s'agit du procédé par voie sèche. Le produit se déplace à l'intérieur par gravité, en raison de l'inclinaison du four et de la rotation de ce dernier, de sorte qu'il progresse peu à peu dans le four, de l'entrée par la partie supérieure jusqu'à la sortie par la partie inférieure, en parcourant toutes les zones du four et, par conséquent, en étant exposé à toutes les phases qui se déroulent tout au long de celui-ci.



Figure 3.2.33. Four rotatif.

Le flux du cru dans le four se produit à contre-courant vis-à-vis des gaz chauds provenant de la combustion. Dans le prolongement du four se trouve un refroidisseur, de sorte que le clinker se refroidit avec l'air entrant, qui se réchauffe et sert ainsi à activer la combustion, en apportant l'air nécessaire pour que cette dernière se produise. Lorsque cet air à température élevée parvient à la

partie supérieure du four, il sert à préchauffer et à sécher le cru qui entre progressivement par la partie supérieure du four. Enfin, l'air abandonne le four par une cheminée à une température très élevée et accompagné de poussière de cru, ce qui oblige à disposer d'un système de filtration afin d'éviter les émissions de poussière dans l'air ambiant.

La charge de produit couvre normalement uniquement 10 à 12 % de la section intérieure du four. Le combustible est injecté par l'extrémité inférieure du four à travers une tuyère ou un brûleur qui est alimenté en charbon pulvérisé ou en fuel lourd.

Dans le cas de la voie humide, la longueur des fours est supérieure en raison du fait qu'ils doivent disposer d'une zone de séchage pour y éliminer l'eau de la pâte. C'est le point faible du procédé par voie humide, car cette zone de séchage impose de plus grandes exigences d'espace et entraîne une grande consommation de combustible.

Dans le four à clinker, la combustion se produit dans une ou deux zones en fonction de la technologie appliquée :

- Sur le brûleur principal, présent dans tous les fours et situé dans la partie la plus basse du four rotatif. La flamme atteint une température proche de 2 000 °C. Les gaz de combustion se maintiennent à plus de 1 200 °C pendant une durée supérieure à 5 secondes, dans une atmosphère oxydante (excédent d'oxygène) ;
- Dans la zone du four où se produit la décarbonatation du calcaire (calcination), dans laquelle la combustion s'effectue à des températures proches de 1 200 °C, les gaz se maintenant à une température supérieure à 850 °C pendant environ 3 secondes.

L'emplacement exact de la seconde zone de combustion varie en fonction des types de fours. Les fours modernes disposent de chambres de combustion dans la partie basse de la tour à cyclones (précalcinateur), où la combustion se produit avec un apport d'air chaud provenant du refroidisseur de clinker. Certains fours sont équipés d'un précalcinateur sans apport d'air tertiaire, la combustion se produisant alors avec l'excédent d'oxygène provenant du brûleur principal.

Dans les fours à voie sèche ne disposant pas de précalcinateur, ou dans les fours à voie semi-sèche ou semi-humide, la combustion peut se produire dans la première zone du four rotatif. Ce système est particulièrement indiqué pour les combustibles denses et ayant des tailles relativement grandes lors de leur introduction (comme par exemple les pneumatiques entiers ou en morceaux).

Dans les fours à voie humide et dans les fours longs, l'alimentation en combustibles alternatifs peut s'effectuer dans une zone du four rotatif appropriée à cet effet (système breveté « Mid Kiln »). L'ouverture pratiquée dans le four rotatif et le système de portes permettent d'alimenter le four en combustible à chaque rotation de ce dernier.

Tableau 3.2.5. Conditions de combustion dans les fours rotatifs.

Paramètre	Plages
Température de combustion	1 800 à 2 000 °C (brûleur principal)
Temps de rétention	5 à 10 s à T > 1 200 °C
Teneur en oxygène	2 à 3 %

Source : Cembureau

Si les matières premières d'entrée au four possèdent une teneur élevée en alcalis et si le ciment produit doit en avoir une teneur inférieure ou faible, il est possible d'ajouter un by-pass pour les éliminer. Dans la zone de frittage du procédé de cuisson du clinker, où des températures de 1 450 °C sont atteintes, certains alcalis se volatilisent, en particulier s'ils sont présents sous la forme de sulfates. Les alcalis volatilisés sont entraînés avec le courant de gaz chauds qui, dans le cas d'un four équipé de préchauffeurs, se réintroduisent dans le système. Pour réduire la teneur en alcalis, un by-pass est installé pour extraire une partie des gaz chauds du système, ces derniers passant ensuite

par un système de filtration pour éliminer les particules riches en composés alcalins. Le volume des gaz qui doivent être déviés vers le by-pass dépend des quantités d'alcalis à éliminer, un pourcentage compris entre 10 et 20 % étant normalement suffisant pour obtenir un niveau acceptable.

Fours rotatifs longs

Les fours longs sont les types de fours rotatifs les plus anciens employés dans la production de clinker de ciment.

Le rapport longueur/diamètre des plus grands fours longs est de 38:1 et leur longueur peut dépasser 200 mètres. Ils sont conçus pour exécuter toutes les phases du procédé, qui vont du séchage à la clinkérisation (séchage, préchauffage, précalcination et clinkérisation), de sorte qu'il ne leur manque que le système d'alimentation et le refroidisseur. La première partie des fours longs est équipée d'écrans à chaînes pour améliorer le transfert thermique.

Ces fours (figure 3.2.34.) peuvent être alimentés en pâte, en tourteaux de filtration broyés, en nodules ou cru sec, et ils sont dès lors valables pour tous les types de procédés. De nos jours, cependant, les fours longs ne sont utilisés que si la matière première est humide car, si l'humidité des matières premières permet de procéder par voie sèche, les nouvelles installations ont recours à des fours plus courts avec plusieurs étapes d'échange de chaleur, ces derniers étant plus efficaces du point de vue énergétique.

Le procédé par voie humide avec des fours longs a été développé pour les matières premières très humides, plus faciles à homogénéiser une fois diluée dans l'eau. Une fois concassées, mélangées et homogénéisées sous forme de pâte, celles-ci sont directement introduites dans le four rotatif avec un contenu d'eau de 32 à 40 % pour augmenter leur fluidité. L'eau s'évapore dans la zone de séchage, dans la section d'entrée.

Les fours longs à voie humide se caractérisent par des dimensions importantes par rapport à leur capacité de production (maximum 3 600 t/j). C'est ce qui ressort des courbes représentant les rapports entre la production et le diamètre intérieur du briquetage (figure 3.2.35.) d'une part, et entre la production et le volume intérieur du briquetage (figure 3.2.36.) d'autre part.

La production volumétrique des fours à voie humide varie dans une plage de 0,3 à 0,9 t/j*m³, avec une moyenne de 0,6 t/j*m³. On constate une tendance à la réduction de ce quotient, parallèlement à une augmentation du diamètre du four.

La charge thermique dans la zone de cuisson (pour la section transversale de cette zone mesurée à l'intérieur du briquetage) varie dans une plage comprise entre 14,2 et 29,7 GJ/m²*h, avec une valeur moyenne de 19,6 GJ/m²*h. La charge thermique tend à augmenter en même temps que le diamètre du four. Une corrélation assez bonne ($R^2 = 0,91$) s'obtient entre la charge thermique et la production (figure 3.2.37.).

La consommation énergétique des fours à voie humide est très élevée et peut être comprise entre 4 500 et 7 000 kJ/kg de clinker. C'est la raison pour laquelle ces fours sont devenus obsolètes, sauf dans certains cas particuliers, lorsque l'aptitude à consommer des combustibles de remplacement a permis de compenser cette consommation élevée par une réduction sensible du coût unitaire de l'énergie thermique.

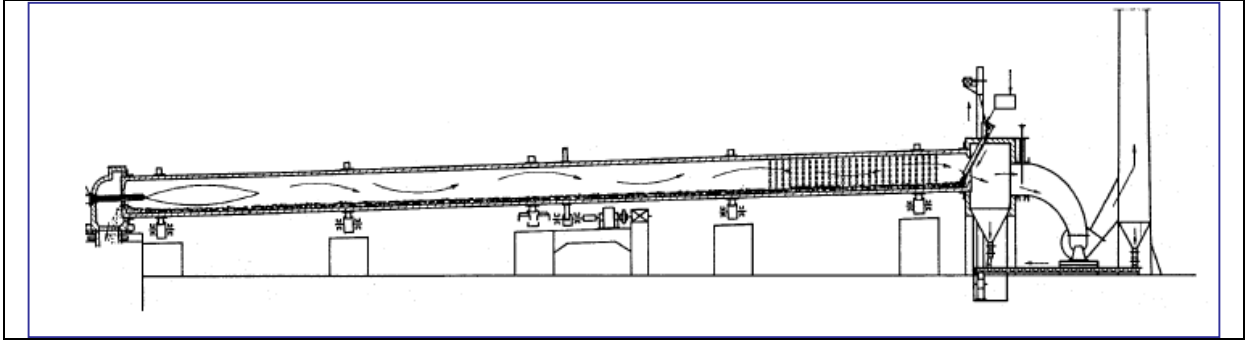
Les avantages d'une installation par voie humide sont pour l'essentiel les suivants :

- Une économie dans la consommation d'énergie électrique comprise entre 15 et 20 % par rapport à la méthode par voie sèche (pour l'ensemble de l'installation) ;
- La possibilité de consommer des combustibles de remplacement ou des déchets industriels en couvrant jusqu'à 100 % des besoins ;
- Une plus grande tolérance, par rapport à la méthode par voie sèche, en ce qui concerne les éléments mineurs (chlorures et sulfates alcalins).

- Une fiabilité mécanique élevée liée à la simplicité.

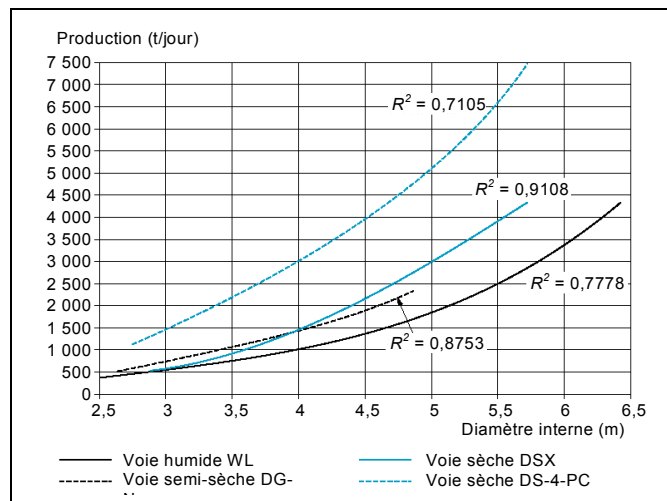
En revanche, ses principaux inconvénients sont les suivants :

- La consommation d'énergie thermique peut être entre 2 et 2,4 fois supérieure à celle de la méthode par voie sèche ;
- La capacité de production unitaire est limitée à 3 600 t/j alors qu'il existe des fours à voie sèche d'une capacité de 7 500 t/j.



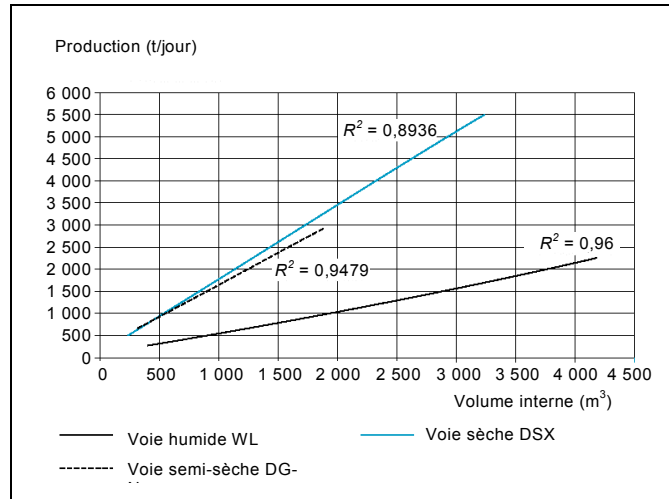
Source : Cembureau

Figure 3.2.34. Four long à voie humide.



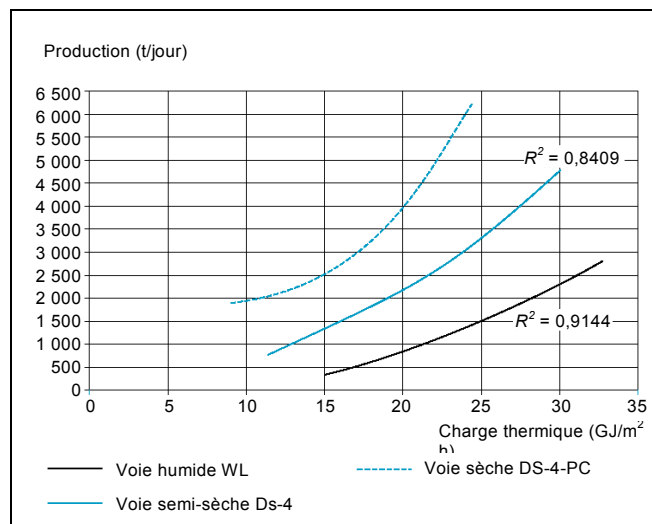
Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.35. Rapport entre la production et le diamètre interne.



Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.36. Rapport entre la production et le volume intérieur du four.



Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.37. Rapport entre la production et la charge thermique.

Fours rotatifs équipés de préchauffeurs

Le rapport longueur/diamètre des fours rotatifs équipés de préchauffeurs est compris entre 10:1 et 17:1. Il existe deux types de préchauffeurs : les préchauffeurs à grille et les préchauffeurs à suspension.

Technologie du préchauffeur à grille

Plus connue sous le nom de four Lepol, la technologie du préchauffeur à grille a été inventée en 1928. Le préchauffeur à grille constitue la première installation dans laquelle une partie du procédé de cuisson (séchage et partie de la décarbonatation) a lieu dans une installation stationnaire en dehors du four, sur une grille mobile. La fin de la décarbonatation et la clinkérisation s'effectuent dans la partie rotative du système de cuisson, ce qui permet que le four rotatif soit plus court, et de cette manière de réduire la perte de chaleur tout en augmentant le rendement énergétique de l'ensemble de l'installation.

Cette méthode a été développée comme alternative à la méthode par voie humide et, par rapport à cette dernière, elle présente l'intérêt d'une forte réduction (entre 20 et 30 %) de la consommation thermique spécifique du système de cuisson.

Dans les fours Lepol, l'opération de cuisson est précédée d'une phase de granulation, de sorte que la matière première est transformée en granules acceptables par la grille. Dans le préchauffeur à grille (voir figure 3.2.39.), les granules composés de farine crue et d'eau (procédé par voie semi-sèche) ou les tourteaux filtrés de lait humide (procédé par voie semi-humide) sont acheminés sur une grille horizontale mobile qui se déplace à travers un tunnel fermé. L'air peut passer à travers les plaques de la grille. Le tunnel se compose d'une chambre à gaz chaud et d'une chambre de séchage séparées par une cloison traversée par la grille. La cloison permet d'éviter au maximum le passage des fumées chaudes vers la chambre de séchage.

À une température de l'ordre de 1 000 °C, les gaz de combustion du four rotatif, aspirés par un ventilateur, traversent le lit de granules à deux reprises :

- D'abord à travers les couches de granules dans la chambre à gaz chaud, en cédant une grande partie de leur chaleur, pour abandonner la grille à 100-120 °C, puis à travers les cyclones du collecteur intermédiaire de poudre, où sont éliminées les grandes particules de poudre susceptibles de provoquer l'usure du ventilateur ;
- Un second ventilateur dirige ensuite le gaz vers la partie supérieure de la chambre de séchage, où il traverse les couches humides de granules, et le conduit finalement vers le collecteur de poudre.

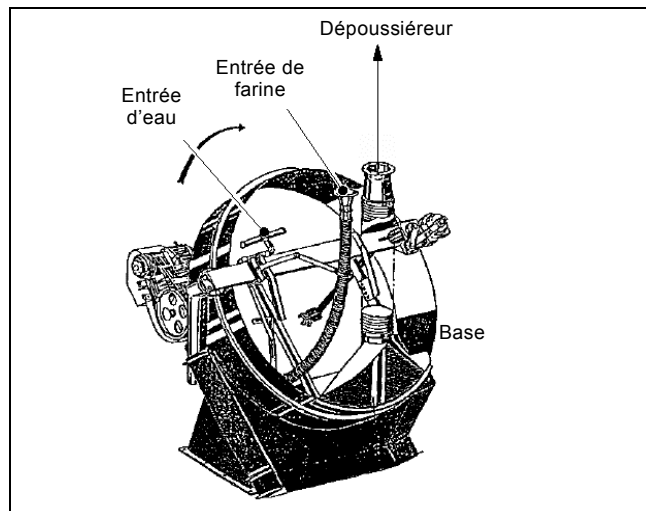
Pendant cet échange, les granules secs et partiellement décarbonatés (de 20 à 30 %), pénètrent dans le four à une température de 840 °C.

La grille Lepol se compose d'un ensemble sans fin de plaques, d'une largeur comprise entre 4 et 5,6 m et d'une longueur entre axes de 20 à 62 m. L'épaisseur de la couche de granules est réglable entre 150 et 200 mm. La vitesse de la grille est réglable entre 25 et 50 m/h.

Pour augmenter la production de l'installation au-delà de la production nominale, un brûleur auxiliaire de précalcination est utilisé dans la chambre chaude afin d'offrir une marge de manœuvre, en termes de ventilation, afin de porter la quantité d'oxygène à la sortie du four de 1,5 à 3,5-4,5 %. Par conséquent, l'air nécessaire à la combustion du combustible de précalcination est amené par les fumées du four. Entre 20 et 25 % de la chaleur totale peut être fournie par le brûleur de précalcination, de sorte que la décarbonatation de la farine sur la grille peut atteindre entre 55 et 60 %, au lieu de 20 à 30 % sans précalcination.

Les conditions d'exploitation du four Lepol, ainsi que celles du refroidisseur, sont déterminées par la granulation préalable avant l'introduction dans la partie rotative ; cet aspect se concrétise dans le quotient de production volumétrique. Celui-ci est plus élevé, d'environ 30 %, que dans le cas du four à voie sèche sans précalcination. La production volumétrique des fours Lepol varie dans une plage comprise entre 1,5 et 3,2 t/j*m³, avec une valeur moyenne de 2,1 t/j*m³. Comme dans le cas des fours à voie humide, on constate une tendance à la réduction de la production volumétrique avec l'augmentation du diamètre du four.

Dans la zone de cuisson, la charge thermique varie dans une plage comprise entre 10,2 et 19,2 GJ/m²*h, avec une valeur moyenne de 14,5 GJ/m²*h, sans aucune corrélation avec la production. La consommation thermique de la méthode par voie semi-sèche est inférieure à celle de la méthode par voie semi-humide. On constate qu'elle peut varier dans une plage assez étendue, entre 3 200 et 5 000 kJ/kg de clinker en fonction des conditions d'exploitation.



Source : Techniques de l'Ingénieur

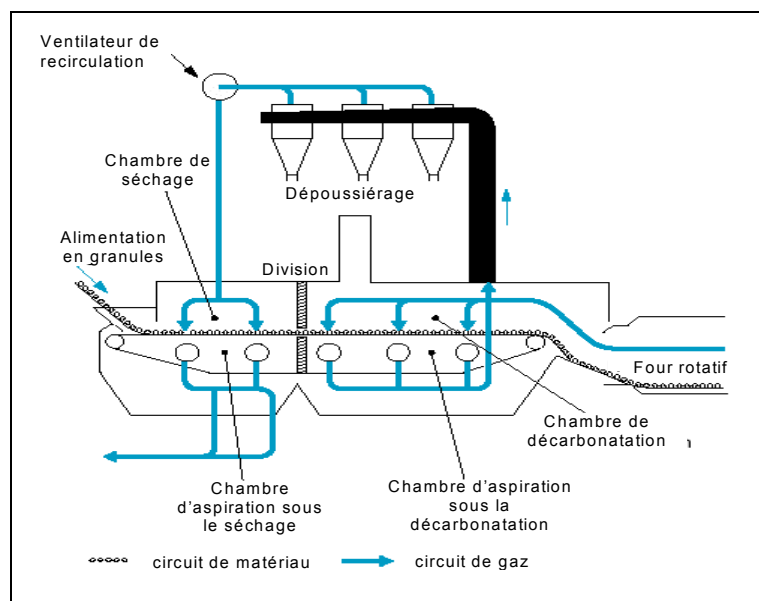
Figure : 3.2.38. Granulateur.

Avantages de la méthode Lepol :

- Consommation d'énergie thermique inférieure à celle du four à voie humide ;
- Bonne granulométrie du clinker ;
- Simplicité d'exploitation ;
- Bon contrôle des recirculations internes.

Inconvénients :

- Nécessité d'une matière première valable pour la granulation ;
- Impossibilité de récupérer la chaleur sensible des fumées à cause de leur faible température ;
- Capacité de production unitaire limitée ;
- Difficulté de contrôler les entrées d'air (20 %) et le profil des pressions dans les chambres de la grille.



Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.39. Grille Lepol.

Technologie du préchauffeur en suspension en X étages : DS-X (Dry Short X)

L'invention du préchauffeur en suspension ou échangeur de chaleur à cyclones, au début des années 30, a constitué une grande innovation dans le processus de fabrication du ciment.

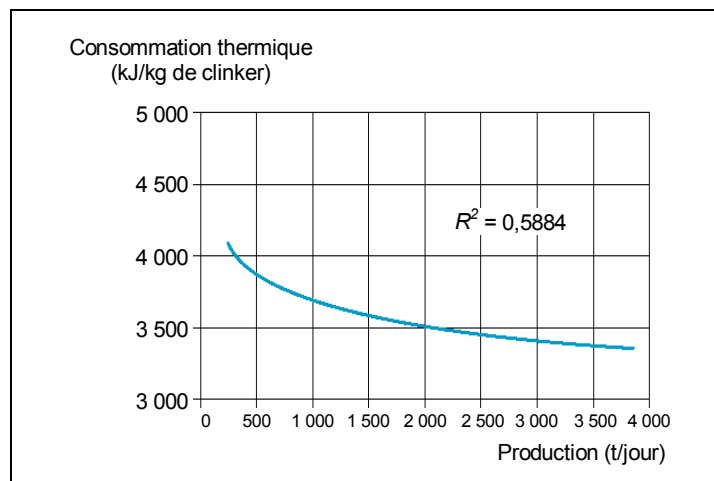
Pour ce type de préchauffeurs, il est nécessaire que le cru soit sec (procédé par voie sèche) ; de sorte que le préchauffage et même la calcination partielle du cru se produisent par le maintien de la farine crue en suspension dans les gaz chauds de combustion du four rotatif.

Ce système de préchauffage permet de réduire significativement la consommation spécifique d'énergie, ce qui a favorisé un remplacement progressif du procédé par voie humide par le procédé par voie sèche avec la technologie de préchauffeur en suspension. De nos jours, ce type de procédé est utilisé pratiquement par tous les fours de l'industrie cimentière en fonctionnement dans le pays du plan d'action pour la Méditerranée.

Par ailleurs, cette méthode a permis de parvenir à des capacités de production unitaires plus importantes, jusqu'à 4 500 à 5 000 t/j, sans recourir à la précalcination. Le plus grand four de ce type a été construit en 1974 avec 6,2 m de diamètre et une production de 5 000 t/j.

La production volumétrique varie dans une plage comprise entre 1,2 et 2,9 t/j*m³, avec une valeur moyenne de 1,7 t/j*m³. La charge thermique dans la zone de cuisson varie entre 11,3 et 30,9 GJ/m²*h, avec une valeur moyenne de 17,1 GJ/m²*h. Il existe une corrélation (0,84) entre la production et la charge thermique (figure 3.2.37.).

Du point de vue théorique, la consommation thermique de la méthode par voie sèche est la plus réduite des quatre procédés pris en considération (voie humide, semi-humide, semi-sèche, sèche), bien qu'on constate qu'elle peut varier dans une plage assez étendue, entre 3 150 et 4 150 kJ/kg de clinker en fonction des conditions d'exploitation (figure 3.2.40). L'effet des dimensions du four, en raison de la réduction des pertes par les parois, permet une amélioration par rapport aux installations de grandes dimensions, et peut atteindre 300 kJ/kg à 400 kJ/kg de clinker.



Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.40. Rapport entre consommation thermique et production.

La cuisson du clinker dans le four à voie sèche équipé de préchauffeurs en suspension implique deux phases :

- Le préchauffage et une décarbonatation partielle (entre 20 et 50 %) s'effectuent dans la partie statique de l'installation : l'échangeur à cyclones ;
- La fin de la décarbonatation et la clinkérisation s'effectuent dans le four rotatif.

Il existe divers systèmes de préchauffeur en suspension. Ils se composent généralement de quatre à six étages de cyclones pour les configurations de matières premières relativement sèches et n'exigeant par une contribution thermique très importante pour en assurer le séchage.

Les cyclones sont disposés l'un sur l'autre dans une tour de 50 à 120 mètres de hauteur. L'étage le plus élevé peut contenir deux cyclones parallèles, de manière à mieux séparer la poudre. Le gaz de combustion du four rotatif circule à travers les étages de cyclones de la partie inférieure vers la partie supérieure. Le mélange de matières premières pulvérulentes sèches est ajouté au gaz de combustion avant le dernier étage supérieur de cyclones. Il est séparé du gaz dans les cyclones et alimente le procédé avant l'étage de cyclones suivant. Cette procédure se répète à tous les étages jusqu'à ce que le matériau soit finalement déchargé du dernier étage dans le four rotatif. Cette alternance de mélange, de séparation et de nouveau mélange à des températures de plus en plus élevées permet d'optimiser le transfert thermique entre la chaleur des gaz de combustion du four et la farine crue.

Les préchauffeurs en suspension présentent des problèmes d'incrustations sur les parois des cyclones et les conduits si les matières premières et/ou le combustible contiennent des niveaux élevés de matières telles que des chlorures, sulfates et alcalis. Ces incrustations provoquent souvent des obstructions, ce qui oblige à arrêter le four pendant un grand nombre de jours. Une solution possible de ce problème réside dans la déviation du gaz du four, c'est-à-dire l'extraction et l'épuration d'une partie du flux de gaz de combustion du four. Ce gaz est refroidi pour condenser les alcalis, puis il est traité dans un collecteur de poussière avant d'être relâché dans l'atmosphère.



Figure 3.2.41. Préchauffeur.

Depuis les années 70, le design standard était le préchauffeur à quatre étages de cyclones (voir figure 3.2.42) ; à cette époque ont été construites de nombreuses installations d'une capacité de 1 000 à 3 000 tonnes/jour.

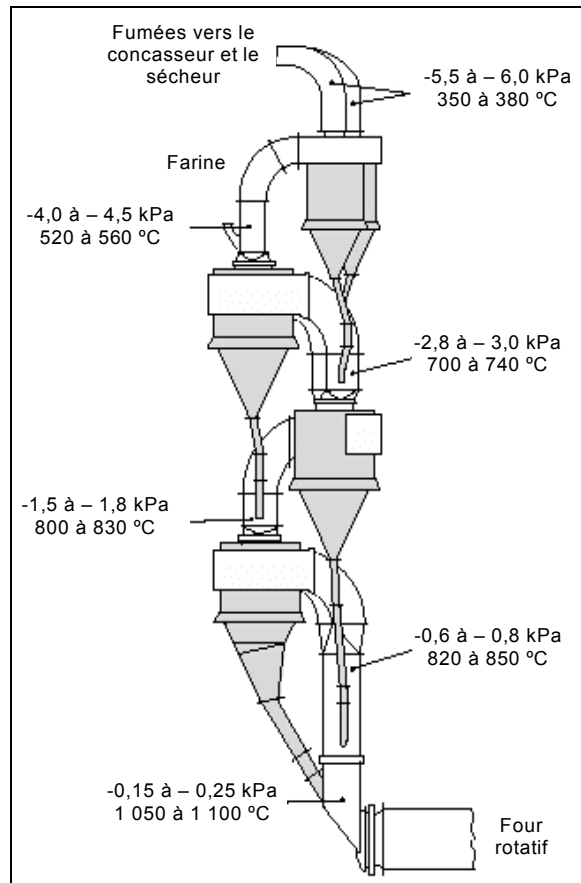
Presque tous les préchauffeurs en suspension à quatre étages sont adossés à des fours rotatifs par trois appuis. D'un diamètre compris entre 3,5 et 6 mètres, les fours présentent des rapports longueur/diamètre de 13:1 à 16:1. Du point de vue mécanique, ces fours sont plus simples que les fours longs à voie sèche et humide et sont les fours les plus communément employés de nos jours.

L'échangeur à 4 étages permet un équilibre entre la chaleur disponible dans les gaz qui ressortent de ce dernier (entre 350 et 380 °C) et le besoin de chaleur pour évaporer l'humidité contenue dans les matières premières, avec 8 ou 9 % d'eau. À l'étage supérieur des cyclones, l'objectif principal consiste à effectuer la séparation et de limiter ainsi les recirculations de matériau (farine). Les valeurs sont normalement proches de 50 g/Nm³, ce qui représente environ 8 % de la production du four.

Les fabricants proposent différentes dispositions (figure 3.2.43.) des échangeurs à cyclones. Les améliorations les plus récentes de l'échangeur consistent à réduire d'une manière très significative les pertes de charge des cyclones sans nuire à la fonction de séparation. Ces modifications peuvent être les suivantes :

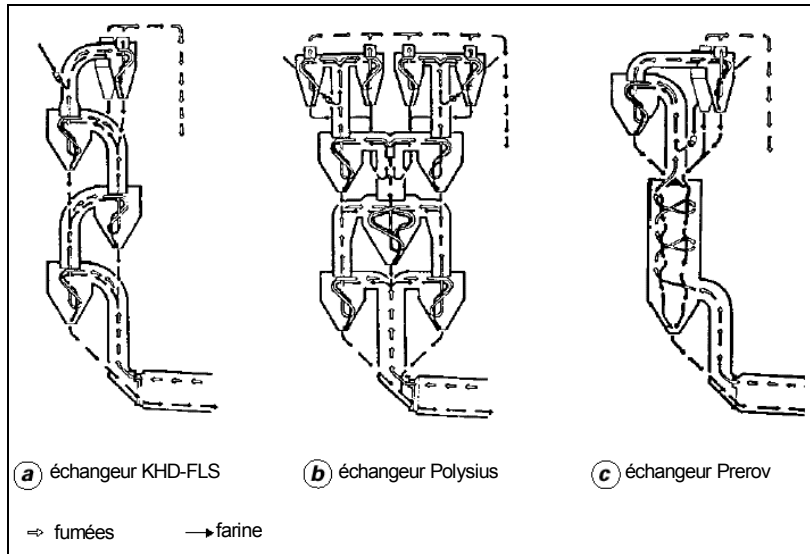
- Modification de la conception du tube d'entrée dans le cyclone ;
- Modification du rapport d'aspect pour obtenir de plus grandes accélérations ;
- Amélioration du comportement des tubes intérieurs des cyclones.

Il est possible de réduire la perte de charge de l'ensemble de l'échangeur à 3 kPa, tandis que les configurations initiales présentaient des pertes d'environ 5,50 kPa pour un échangeur à 4 étages. C'est la raison pour laquelle la consommation spécifique d'énergie électrique a pu être réduite, pour l'ensemble de l'installation, de 25 à 16 kWh/t de clinker.



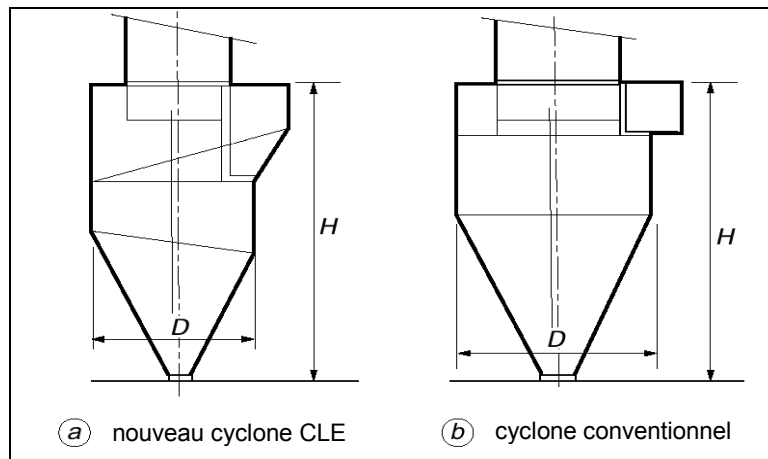
Source : *Techniques de l'Ingénieur*

Figure 3.2.42. Préchauffeur à quatre étages de cyclones.



Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.43. Échangeurs à cyclones.



Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.44. Schéma d'un cyclone.

Pour l'essentiel, les avantages du système de cuisson par voie sèche par préchauffage en suspension sont les suivants :

- La récupération optimale de la chaleur sensible des fumées ;
- La consommation thermique spécifique faible ;
- La grande facilité d'exploitation ;
- La possibilité d'atteindre des capacités de production élevées.

Ses principaux inconvénients sont les suivants :

- La grande sensibilité à la présence d'éléments mineurs (alcalis, chlore, soufre, etc.) ;
- La forte hétérogénéité de la granulométrie du clinker.

Fours rotatifs avec préchauffeur et précalcinateur à X étages : DS-X-SF et DS-X-PC

Motivée par la forte croissance de la consommation de ciment entre 1963 et 1973 (augmentation annuelle de 10 %), l'industrie japonaise a développé la technologie de la précalcination.

La précalcination consiste à déplacer vers l'échangeur à cyclones la partie fondamentale de la phase de décarbonatation (90 %) qui s'effectue dans le four rotatif.

La précalcination a été développée pour satisfaire aux objectifs suivants :

- Augmenter la capacité unitaire des nouveaux outils de production, limitée à des valeurs comprises entre 4 500 et 5 000 t/j avec la méthode par voie sèche classique ;
- Augmenter la capacité de production des installations existantes par voie sèche ou modification d'autres méthodes ;
- Réduire le coût d'investissement exprimé en unités monétaires par tonne de production annuelle ;
- Accroître la fiabilité des installations par la réduction du diamètre du four rotatif (au-dessous de 5,50 m de diamètre, les fours nécessitent des opérations de réparation du matériau réfractaire de la zone de cuisson environ tous les 3 mois au lieu de 12 mois) ;
- Améliorer les consommations spécifiques grâce à l'effet de la réduction des dimensions et à l'amélioration de la qualité de l'échange thermique ;
- Réduire les émissions de NO_x ;
- Permettre une intégration économique de systèmes de by-pass.

De cette manière, la précalcination (PC sur la figure 4.2.45.) a été développée par le biais d'un foyer auxiliaire, dans lequel :

- L'alimentation en matière peut provenir du niveau 3 ou 4 de l'échangeur à cyclones ;
- L'alimentation en combustible s'effectue sous forme de charbon, de fuel ou de coke de pétrole ;
- La contribution en oxygène nécessaire à la combustion peut être assurée soit par les gaz du four, soit par le refroidisseur ;
- La sortie de matériau vers le four rotatif peut se faire à partir du niveau des cyclones inférieurs (4, 5 ou 6).

Dans l'hypothèse de dimensions de fours rotatifs identiques, l'ajout d'un précalcinateur permet d'augmenter la capacité de l'installation d'un facteur de 2 à 2,3.

Principes généraux

L'origine du précalcinateur est à rechercher dans l'observation des principes suivants :

- Le four rotatif est un excellent échangeur de chaleur dans sa partie la plus chaude, la zone de clinkérisation, où l'échange s'effectue par rayonnement. Cette zone représente près de 1/3 de la longueur du four (figure 3.2.46.) ;
- Dans une installation équipée de préchauffeur sans précalcination, la partie fondamentale de la décarbonatation (entre 80 et 90 %) se produit dans le four rotatif. On considère que cette phase occupe 2/3 de la longueur du four et que les conditions d'échange thermique sont de 12 à 17 kJ/kg de clinker et par mètre de four. La figure 3.2.46. montre l'évolution de la température moyenne de la matière dans une installation industrielle ;
- La phase de décarbonatation se caractérise par des besoins de chaleur plus importants par rapport à l'ensemble des phases de la méthode (1.965 kJ/kg de clinker). La figure 4.2.47. illustre l'évolution d'une petite quantité de matière, en laboratoire, selon le cycle chaleur « Q » et la température « T » des procédés. Dans une installation industrielle, où les températures ne

sont pas homogènes, on constate (figure 3.2.46) un début de décarbonatation avant la température moyenne de 900 °C et une décarbonatation totale au-delà de 900 °C ;

- L'échange de chaleur entre la matière et les fumées, qui se produit par convection, est amélioré par la mise en suspension des matières, bien que la divergence de température soit faible (figure 3.2.46.).

En partie sur base de ces observations, la société japonaise IHI a développé au début des années 1970 le préchauffeur désigné sous le nom de procédé SF (« Suspension Furnace »), grâce auquel la décarbonatation du cru atteint entre 80 et 90 % avant son introduction dans le four rotatif. Entre 50 et 60 % du combustible est utilisé dans le four de précalcination.

En fonction de la proportion de combustible injectée dans la précalcination, la proportion de décarbonatation obtenue est la suivante :

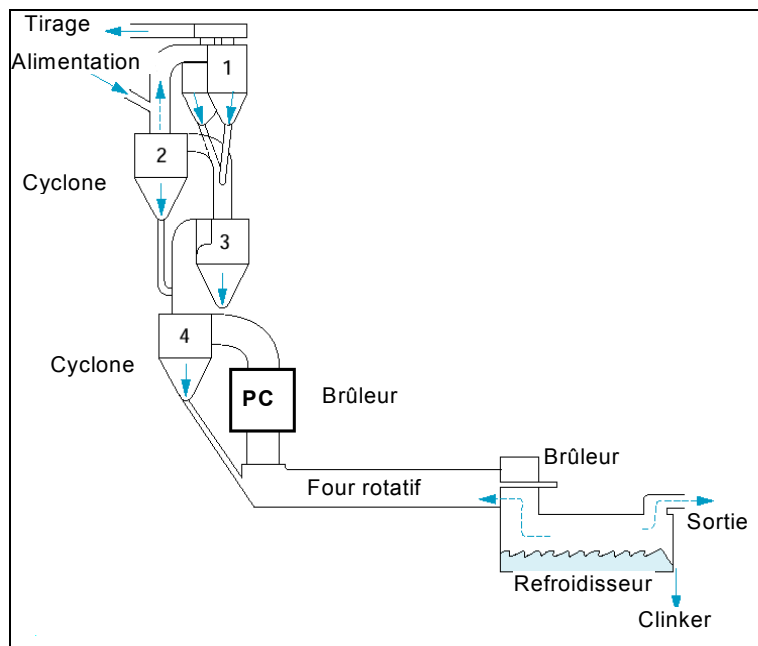
Tableau 3.2.6. Proportion de décarbonatation.

Taux de combustible injecté dans la précalcination	Taux de décarbonatation
10 %	20 %
55 %	80 %

Source : Techniques de l'Ingénieur

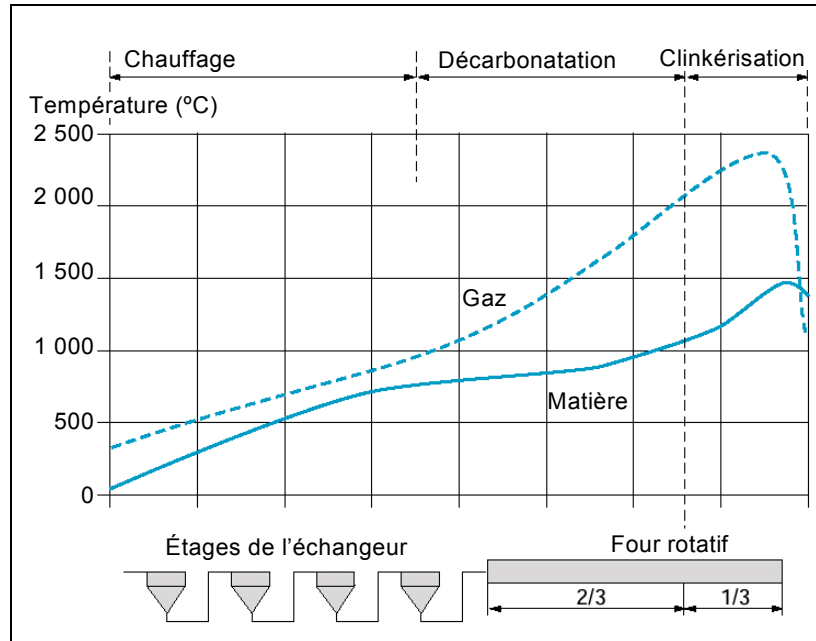
On distingue deux systèmes de précalcination en fonction de la méthode d'alimentation en air de combustion :

- Sans conduit d'air tertiaire ;
- Avec conduit d'air tertiaire.



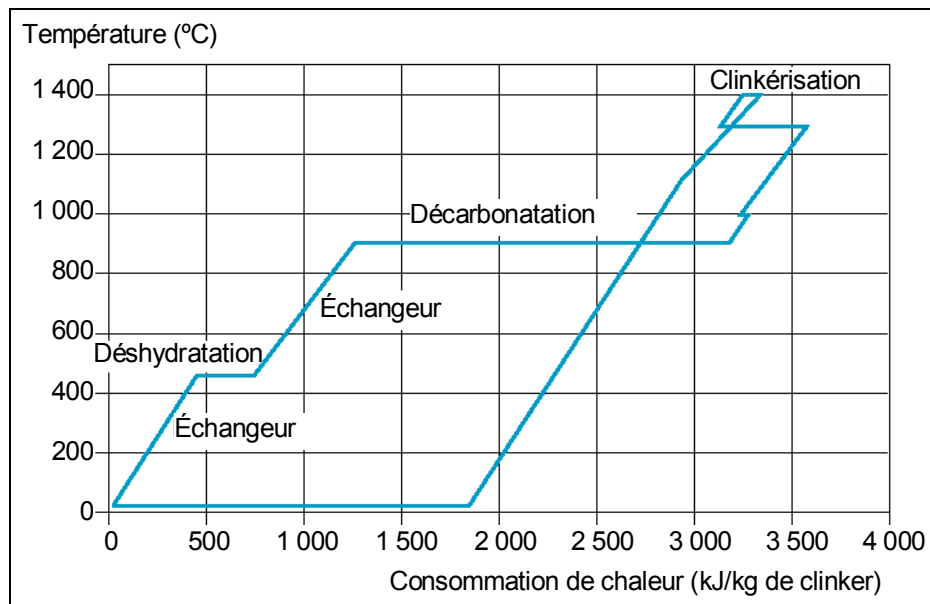
Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.45. Four avec préchauffeur et précalcinateur.



Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.46. Profil de températures des gaz dans le procédé de cuisson.

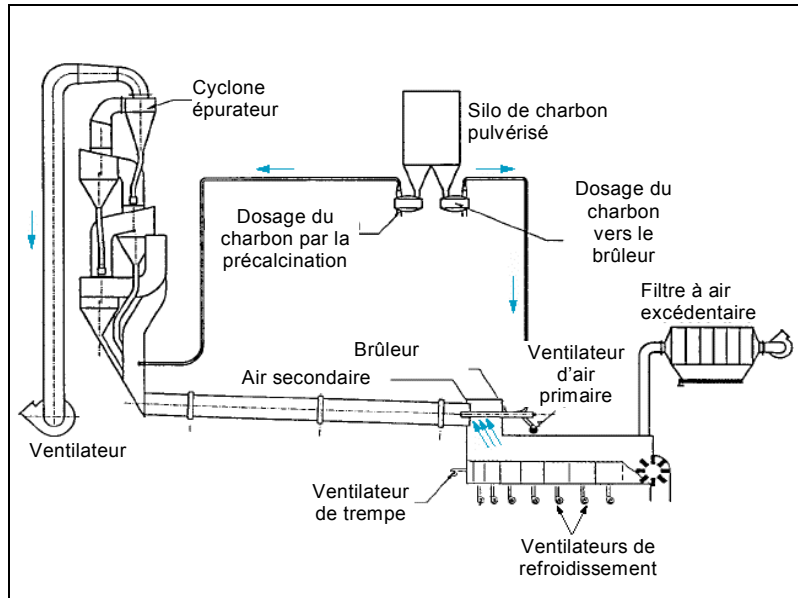


Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.47. Procédé de cuisson.

Précalcination sans air tertiaire

Dans la précalcination sans air tertiaire (figure 3.2.48.), l'air de combustion est apporté par l'excédent d'air du brûleur du four rotatif.



Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.48. Précalcination sans air tertiaire.

Sur la figure 3.2.49., le réseau de courbes permet de déterminer, pour un excédent d'air défini dans la précalcination, l'excédent d'air nécessaire au brûleur principal pour obtenir un taux de précalcination choisi.

Ceci provoque une réduction de la température de la flamme T de plus de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, car cela implique une forte diminution des échanges thermiques dans la zone de cuisson, où ces derniers se produisent par rayonnement (proportionnels à T^4).

La figure 3.2.48. permet d'évaluer la variation de la température adiabatique de la flamme du brûleur principal en fonction de l'excédent d'air. Au-delà d'un taux de précalcination d'environ 15 à 20 %, la flamme n'est pas suffisamment chaude pour garantir une clinkérisation correcte ; c'est le principal inconvénient de cette technique.

Les courbes des figures sont établies pour un charbon à PCI (pouvoir calorifique inférieur) de 31 MJ/kg .

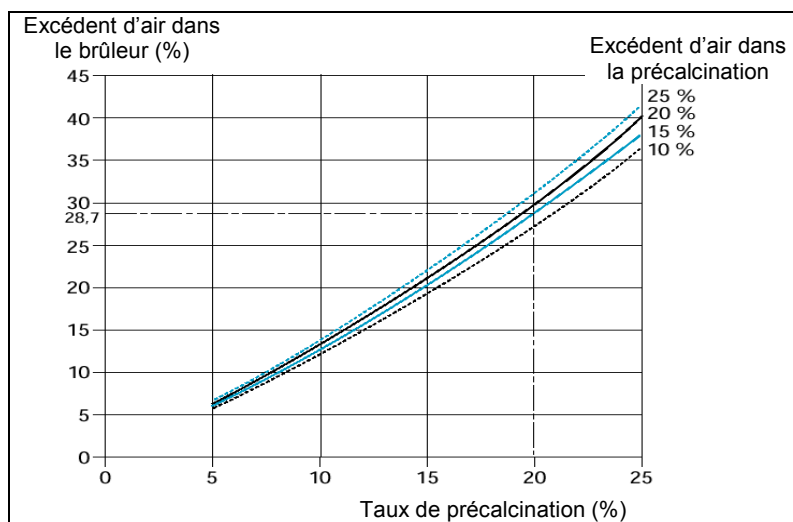
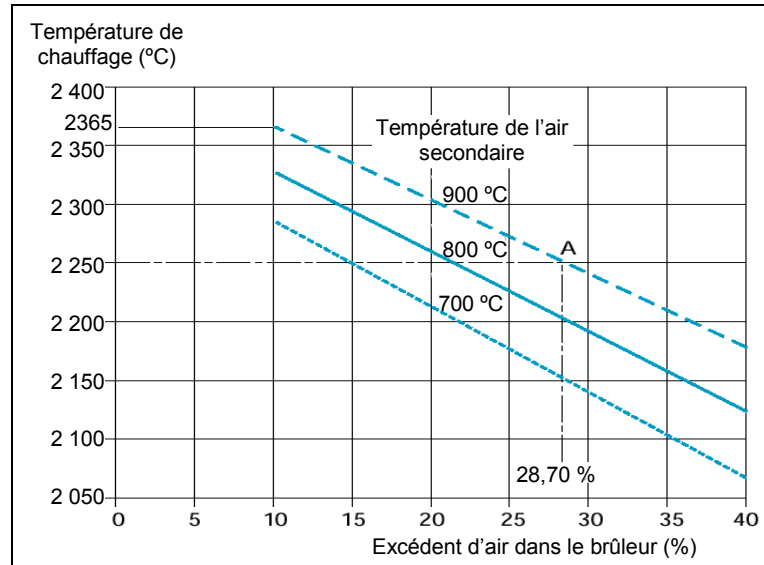


Figure 3.2.49. Rapport entre l'excédent d'air du brûleur et le taux de précalcination.



Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.50. Rapport entre la température de la flamme et l'excédent d'air.

Ce type de précalcination n'est pas prévu dans le cadre de nouvelles installations, mais il est utilisé dans des installations existantes lorsque l'on vise à :

- Obtenir une légère augmentation de la capacité de production sans effectuer une modification importante ;
- Réduire la charge thermique dans la zone de cuisson pour une capacité de production identique.

Les fumées de sortie du four sont acheminées à la précalcination à travers un conduit vertical. Ce conduit peut être allongé et modifié en forme de coude, de manière à offrir une durée suffisante pour garantir la combustion. Dans la pratique, la combustion est rarement complète, et on observe une teneur en CO d'environ 0,1 à 0,2 %.

La production volumétrique des fours à précalcination sans air tertiaire (ou partiel) est en moyenne de $2,49 \text{ t/j}\cdot\text{m}^3$; la charge thermique dans la zone de cuisson étant en moyenne de $19,6 \text{ GJ/m}^2\cdot\text{h}$.

La comparaison de ces données avec celles du procédé par voie sèche sans précalcination révèle que la précalcination sans air tertiaire ou partiel permet d'augmenter la production spécifique d'environ 20%, au détriment d'une augmentation importante de la charge thermique, qui est alors du même ordre que celle du procédé par voie humide.

Précalcination avec air tertiaire

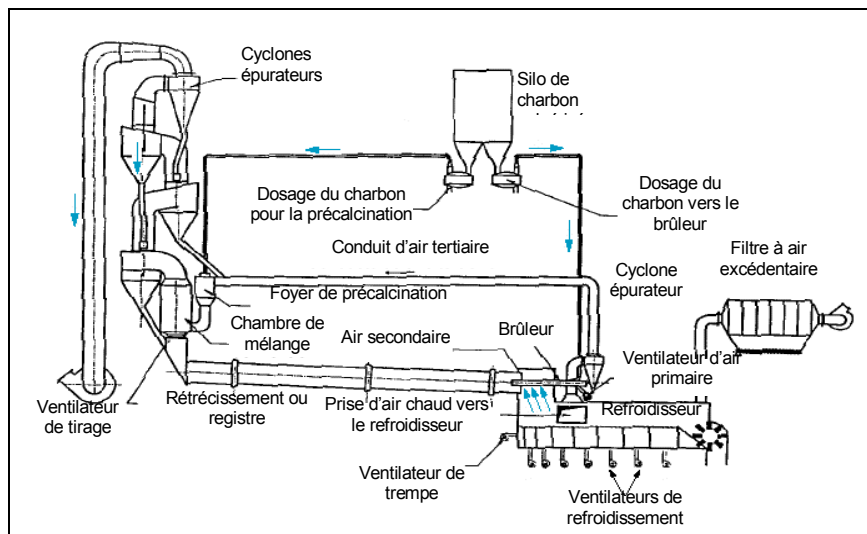
Dans la précalcination avec air tertiaire, l'air de combustion du foyer de précalcination est fourni par un conduit indépendant. Ceci permet d'atteindre des niveaux de précalcination supérieurs à 20 %, et allant même jusqu'à 95 %. La figure 3.2.51. donne le schéma de principe général. Le système le plus complet comprend les éléments suivants :

- Un foyer installé dans la partie basse du préchauffeur. Celui-ci reçoit l'air de combustion provenant du four ou du refroidisseur de clinker à travers un conduit d'air tertiaire qui borde le four. L'air tertiaire est épuré pour en éliminer la poussière, par un cyclone ou une chambre de décantation ;
- Une chambre de mélange, dont la fonction consiste à mélanger les gaz provenant du four rotatif et ceux provenant du foyer de précalcination ;

- Un rétrécissement ou un registre, dont l'objectif consiste à permettre le réglage des proportions de gaz ;
- Deux systèmes de mesure de combustible, l'un pour le brûleur à la tête du four et l'autre pour le précalcinateur.

Dans ce cas de précalcination avec air tertiaire, l'inconvénient principal du préchauffeur sans air tertiaire disparaît, puisque l'excédent d'air dans le brûleur est identique à celui d'un four sans précalcination.

La production volumétrique des fours dotés de précalcination avec air tertiaire est en moyenne de $3,5 \text{ t/j} \cdot \text{m}^3$; la charge thermique de la zone de cuisson étant de $16 \text{ GJ/m}^2 \cdot \text{h}$. Par rapport au procédé par voie sèche sans précalcination, l'augmentation de production est en moyenne de 2,1, tandis que la charge thermique de la zone de cuisson est approximativement la même.



Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.51. Précalcination avec air tertiaire.

Classification

Les systèmes de précalcination se classent en trois catégories :

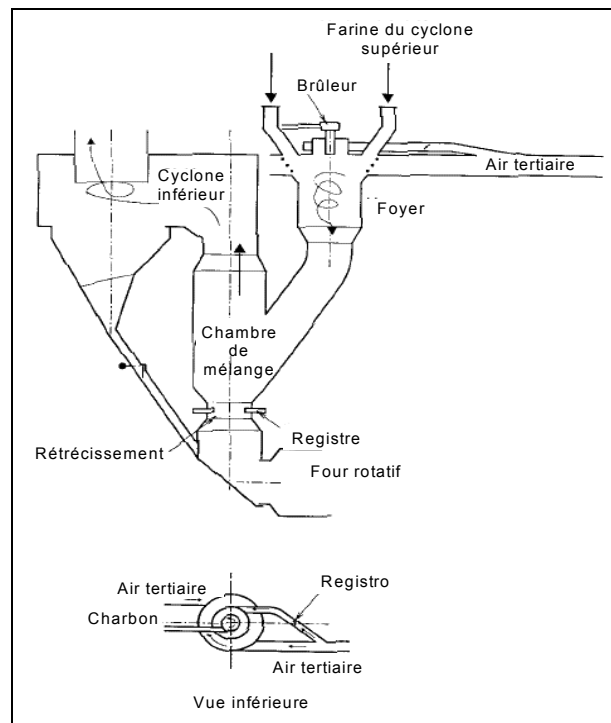
- **Classe 1** : Regroupe les systèmes dans lesquels la matière est mise en suspension dans un conduit tubulaire dans lequel la matière et les gaz entrent en contact. La longueur du conduit est adaptée pour obtenir un temps de contact suffisant. Ce groupe correspond aux systèmes les plus simples et ne possède pas de conduit d'air tertiaire ;
- **Classe 2** : Regroupe les systèmes dans lesquels la suspension de la matière n'est pas linéaire, mais bien accélérée en spirale, dans un tourbillon dans lequel les turbulences doivent activer les échanges. La plupart des systèmes proposés appartiennent à ce groupe ;
- **Classe 3** : Dans cette catégorie, la matière séjourne beaucoup plus longtemps dans le foyer de précalcination. Ce groupe est en phase de développement et il n'existe que peu de réalisations industrielles.

Réalisations industrielles

Les avantages indéniables de la précalcination ont encouragé les fournisseurs à proposer une grande variété de solutions technologiques industrielles. En voici quelques exemples à titre d'illustration.

Le système *RSP* (Reinforced Suspension Preheater), d'Onoda Cement Co., dont la première réalisation industrielle date de 1972 (Tahara, Japon). Ce système, représenté sur la figure 3.2.52.,

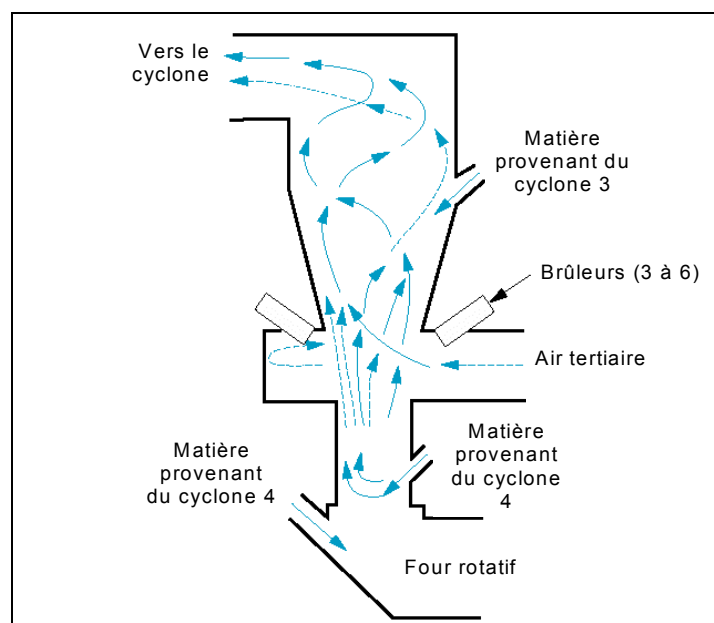
comporte un foyer, une chambre de mélange, un rétrécissement, un registre ; Il correspond à la classe 2.



Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.52. Système RSP.

Le système NSF, d'IHI Co., dont la première réalisation industrielle date de 1971 (Chichibu, Japon). Deux versions successives ont été conçues : SF et NSF (figure 4.2.53.). Elles se distinguent par la position des brûleurs et l'introduction de la matière dans le foyer, et correspondent à la classe 2.

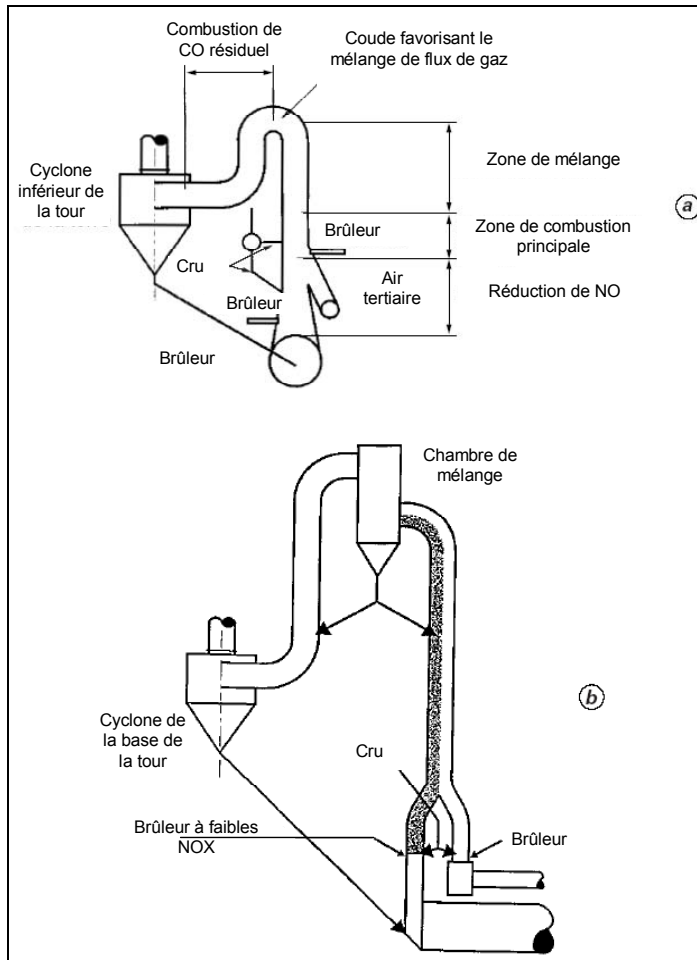


Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.53. Système NSF.

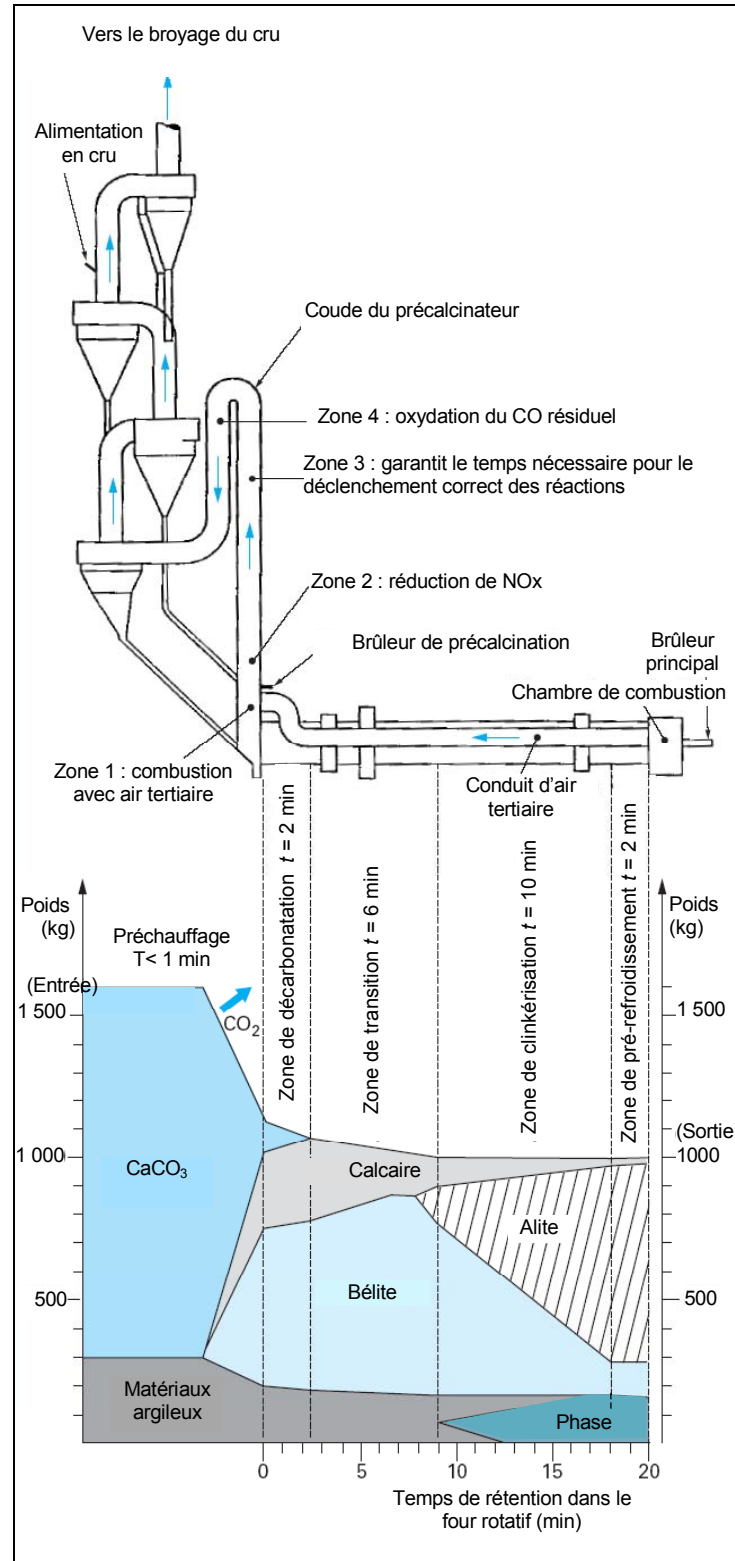
Système Pyroclon de KHD (Cologne, Allemagne)

- Pyroclon S : le premier système Pyroclon S (Spécial) emploie la technique de précalcination sans air tertiaire et appartient à la *classe 1* ;
- Pyroclon R et RP : les systèmes suivants Pyroclon R (Regular) (figure 3.2.54.) et RP (Regular-Pyrorapid) utilisent ou non les fumées du four dans un conduit de précalcination alimenté en air tertiaire (*classe 2*). Une chambre de mélange est installée de manière tangentielle à l'entrée et à la sortie dans la partie supérieure de la chambre de précalcination. Le précalcinateur se compose de 4 sections ;
- Pyrorapid : les systèmes de précalcination R, RP et RP *low NOx* peuvent être associés à un four rotatif désigné sous l'appellation de Pyrorapid (figure 3.2.55.).



Source : *Techniques de l'Ingénieur*

Figure 3.2.54. Système Pyroclon R.



Source : Techniques de l'Ingénieur

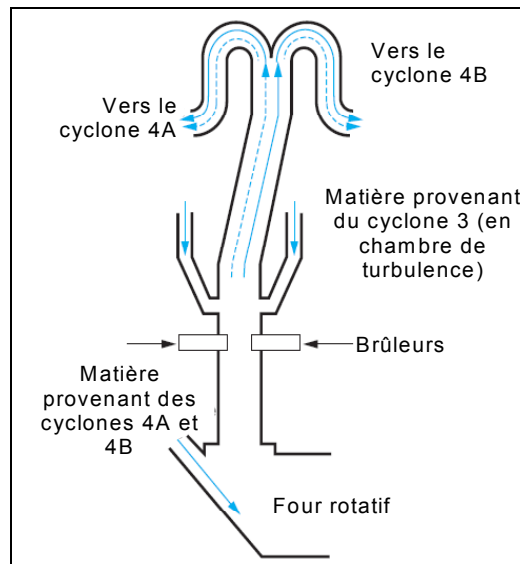
Figure 3.2.55. Système Pyroclon associé à un four Pyrorapid. Évolution du poids des matières solides.

Systèmes Prepol de Polysius

- La précalcination AT (Air Through) s'effectue sans air tertiaire (*classe 1*) dans une enveloppe rectangulaire qui raccorde le four aux cyclones du niveau inférieur. Dans ce conduit, les

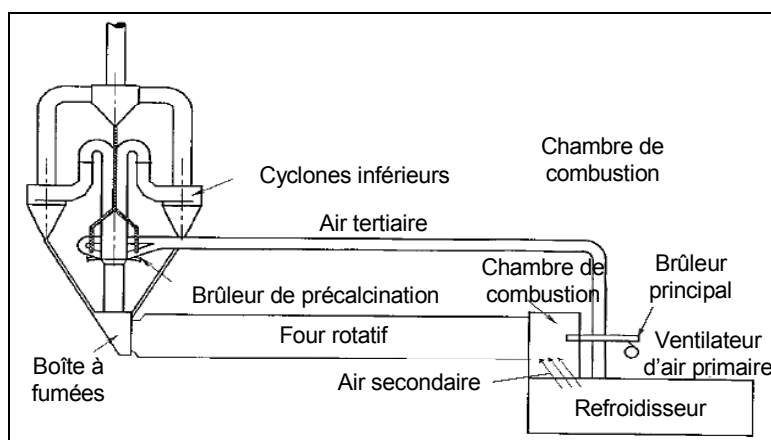
fumées du four rencontrent la matière provenant de la chambre de turbulences (niveau 3) à 700 °C environ et le combustible injecté de chaque côté (figure 3.2.56.) ;

- Précalcinateur AS et AS-LC. Le précalcinateur AS (Air Separate) est constitué par un tube vertical suivi d'un coude supérieur avant les cyclones inférieurs du préchauffeur (figure 3.2.57.). L'alternative LC (low calories), - classe 1 – permet la combustion d'un combustible de qualité médiocre, à faible pouvoir calorifique – à haute teneur en cendres ;
- Précalcinateur AS- C.C. Ce précalcinateur AS- C.C. (Air Separate Low Calories, classe 2) comprend une chambre de combustion et une chambre de mélange. Il est représenté sur la figure 3.2.58 ;
- Précalcinateur AS- MSC Ce système, dont les initiales signifient « Multi Stage Calciner », a été conçu dans le but d'obtenir une réduction des émissions de NOx. Son principe repose sur une combustion graduelle (figure 3.2.59.) ;
- Les systèmes AS (classe 2) offrent la possibilité d'installer une injection d'ammoniac s'il est nécessaire d'aller plus loin dans la réduction de NOx. Ils présentent en effet une plage de températures qui permet cette injection dans le cadre de la méthode SNCR (réduction sélective non catalytique).



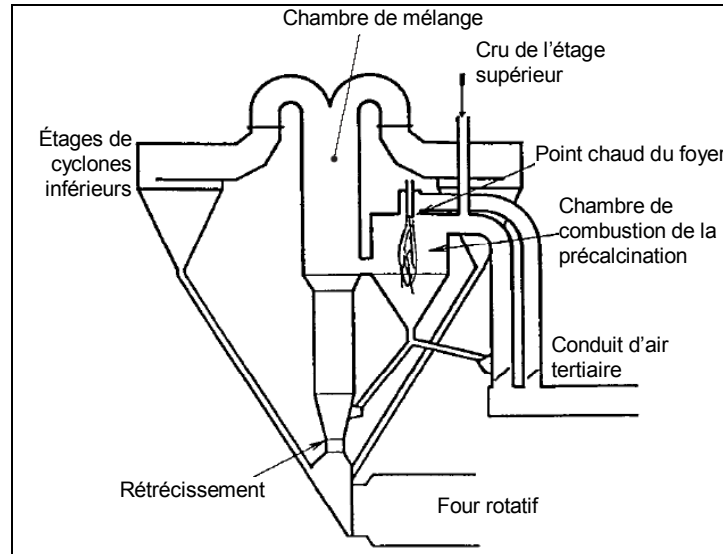
Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.56. Système Prepol AT.



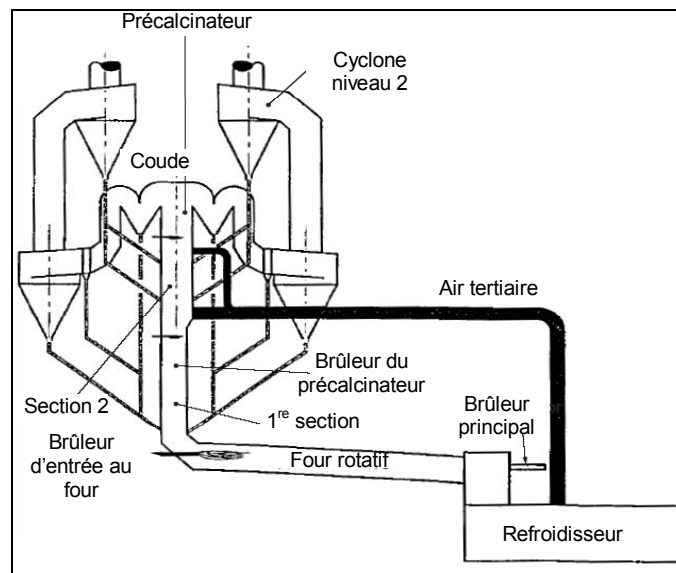
Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.57. Système Prepol AS.



Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.58. Système Prepol AS-CC.



Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.59. Système Prepol AS-MS-C.

Système FCB Ciments français.

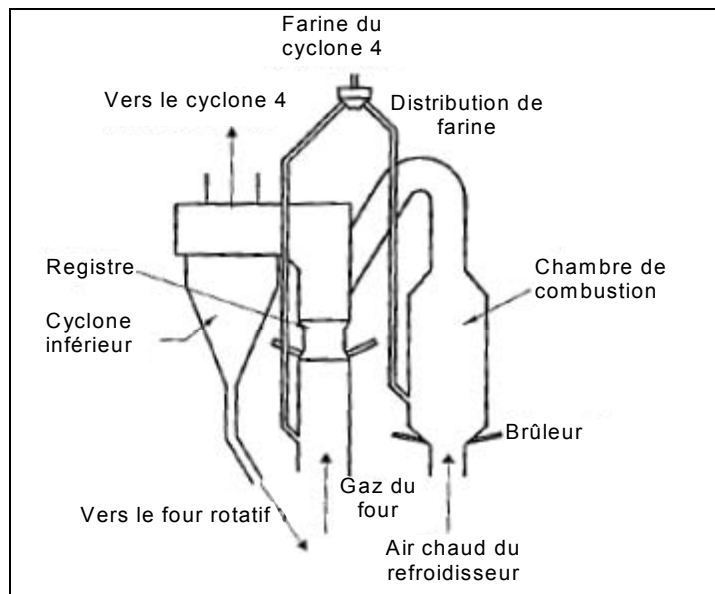
Dans le foyer de ce précalcinateur *Five Coil Babcock (FCB)*, de classe 2, les flux ne sont pas mis en rotation.

Systèmes FL Smidth

Les premières évolutions datent de 1974. Cette entreprise danoise propose les systèmes suivants (de classe 2):

- Le système ILC (In line calciner). Ce système est employé avec un tour simple. Le précalcinateur se trouve dans le tube vertical du four rotatif. Le fabricant préconise ce système pour des productions comprises entre 1 500 et 4 000 t/j. Le quotient de précalcination admis est de 55 à 65 % et il permet un transfert de gaz allant jusqu'à 100 % ;

- Le système SLC-S (Separate line calciner special). Semblable au précédent (figure 3.2.60.), ce montage utilise un tour simple ou double. La chambre de combustion est agencée parallèlement au tube vertical du four. Ce montage est recommandé pour une production comprise entre 1 500 et 5 500 t/j, le pourcentage de précalcination étant de 55 à 60 % ;
- Le système SLC (Separate line calciner). Le dispositif SLC s'adapte au système des préchauffeurs à double ligne de cyclones. Il s'installe sur le précalcinateur parallèlement au tube vertical du four rotatif. Comme dans le système précédent, la combustion s'effectue dans de l'air pur et chaud. Les recommandations du fabricant sont les suivantes :
 - Production : à partir de 3 000 t/j ;
 - Quotient de précalcination : entre 55 et 65 % ;
 - Déviation possible : jusqu'à 30 %.

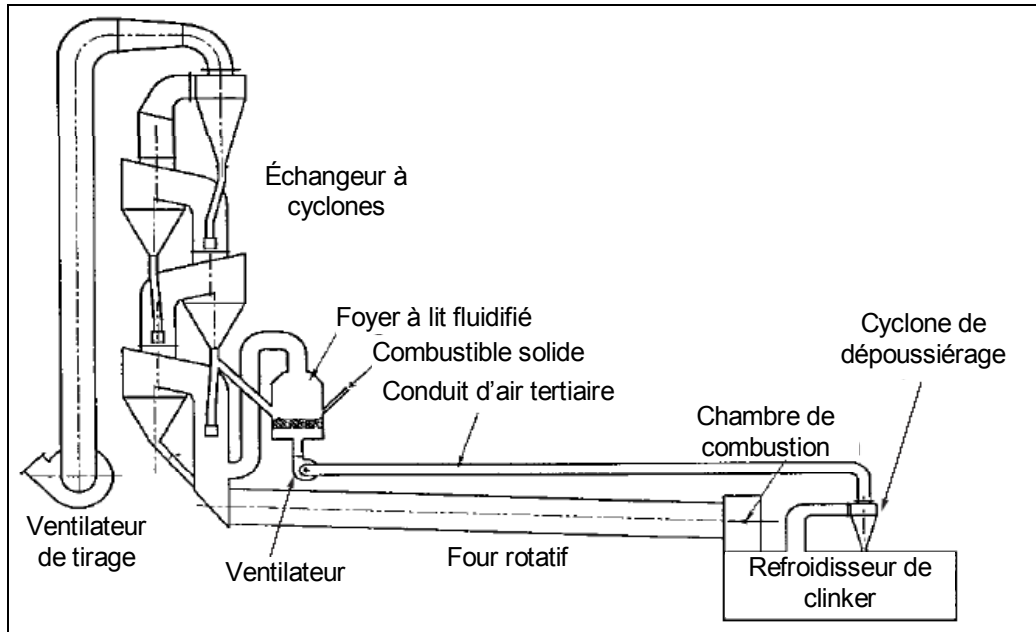


Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.60. Système SLC.

Système MFC de Mitsubishi

La première évolution industrielle date de 1972. Cette entreprise japonaise a conçu un foyer de précalcination qui fonctionnait sur lit fluidifié. Les deux types, MFCa « carry-over » et MFCb « over flow », présentent peu de différences. La figure 3.2.61. illustre le premier type. L'utilisation d'un lit fluidifié permet en théorie d'employer des combustibles de faible qualité. Malgré cet avantage, ce type de foyers n'a pas eu de succès dans les pays du plan d'action pour la Méditerranée.



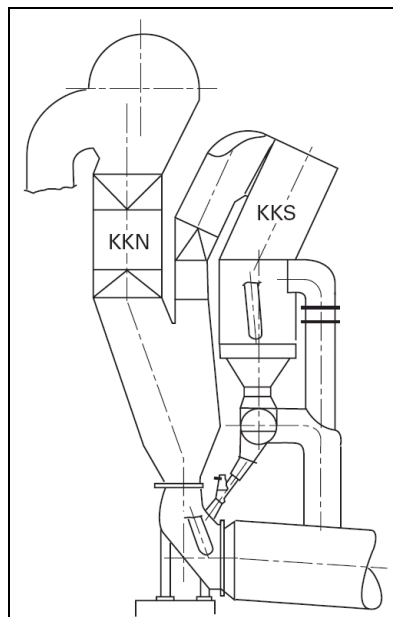
Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.61. Système MFC de Mitsubishi.

Précalcinateur Prerov

Le précalcinateur Prerov (figure 3.2.62.) se compose de deux parties :

- Le précalcinateur (KKS) proprement dit, dans la partie inférieure duquel la farine des cyclones N-1 et le combustible sont introduits ;
- La chambre de post-combustion (KKN), de grande section et dotée d'un coude, garantit une durée de séjour de plusieurs secondes du charbon non brûlé et de la farine provenant du précalcinateur (KKS). Les fumées du précalcinateur et du four se mélangent avant de passer au niveau de cyclone inférieur N.



Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.62. Précalcinateur Prerov.

3.2.4.4. Fours verticaux

Les premiers fours employés étaient des fours verticaux intermittents, similaires à ceux de la cuisson de la chaux, dans lesquels la matière première était chargée sous forme de briquettes, mélangée avec le combustible. Leur emploi dans les pays du plan d'action pour la Méditerranée s'est limité à un nombre réduit de fours, car le clinker provenant d'un four rotatif est de meilleure qualité et de caractéristiques plus régulières, la production des fours rotatifs étant, par ailleurs, plus importante. C'est la raison pour laquelle le four rotatif est actuellement le système le plus employé, en dépit de son coût plus élevé et de l'exigence d'installations plus complexes et de plus grandes dimensions. L'emploi des fours verticaux est de nos jours pratiquement limité à certains pays en voie de développement tels que la Chine (80 % de sa capacité) et l'Inde.

Les fours de ce type sont constitués par un cylindre vertical de 2 à 3 mètres de diamètre et de 8 à 10 mètres de hauteur, revêtu de matériau réfractaire.

Une fois homogénéisé, le cru est mélangé avec le combustible dans les proportions requises, puis il est acheminé vers un mélangeur qui le déverse sur un plateau granulateur, où une petite quantité d'eau est ajoutée à la poudre broyée. Par l'effet de la rotation du plateau granulateur, le cru prend la forme de granules. Ces granules tombent sur la partie haute du four, où ils sont distribués de façon régulière sur sa surface à l'aide d'une trémie rotative. La partie supérieure du four est conique, de manière à maintenir le niveau de compacité par l'effet de retrait des grains pendant le séchage, car ces derniers ont un volume inférieur lorsqu'ils perdent de l'humidité. Au fur et à mesure que ces granules descendent dans la cuve du four, se produisent leurs phases de séchage, de préchauffage, de calcination, de clinkérisation et de refroidissement. Par conséquent, pendant la cuisson, le matériau traverse tout d'abord une zone courte de frittage dans la partie supérieure du four, cette zone étant légèrement évasée. Il est ensuite refroidi par l'air de combustion injecté de la partie inférieure, et tombe sur une grille, dans la partie la plus basse de l'extrémité du four, déjà sous la forme de clinker. Les fours verticaux produisent moins de 300 t/jour de clinker. Ils ne sont économiques que pour les petites usines, et leur nombre s'est par conséquent réduit.

En théorie, les fours verticaux sont capables d'atteindre le rendement énergétique des fours rotatifs, mais dans la pratique, leur consommation énergétique varie entre 3,7 GJ/t et 6,6 GJ/t.

3.2.4.5. Refroidisseurs de clinker

Le refroidisseur de clinker fait partie intégrante du système du four et joue un rôle décisif dans le développement et l'économie du rendement énergétique de l'installation.

Le refroidisseur assume deux fonctions : récupérer un maximum de chaleur du clinker chaud (le clinker sort du four à environ 1 450 °C) pour la restituer au processus et réduire la température du clinker à un niveau permettant de le manipuler.

La chaleur est récupérée par préchauffage de l'air employé pour la combustion dans le brûleur principal, aussi près que possible de la limite thermodynamique. Cependant, cette récupération est entravée par des circonstances telles que les hautes températures, l'abrasivité extrême du clinker et sa vaste plage granulométrique.

Les refroidissements rapides sont bénéfiques pour le clinker : ils améliorent sa broyabilité et optimisent la réactivité du ciment.

Les problèmes typiques des refroidisseurs de clinker sont l'expansion thermique, l'usure, les flux d'air incorrects et un rendement faible.

Il existe trois types principaux de refroidisseurs : rotatifs, planétaires et à grille. Ils sont décrits dans les paragraphes suivants. Il existe d'autres refroidisseurs, comme celui qui est utilisé pour le clinker blanc, qui se distinguent des autres par le besoin de maintenir des conditions réductrices jusqu'à 600 °C, afin de préserver la couleur du produit final.

Pendant les années soixante-dix, le refroidisseur planétaire ou à satellites prédominait, au détriment du refroidisseur à grille, pour des raisons de fiabilité, de coût de maintenance, de simplicité d'exploitation et de coût d'investissement (absence d'élimination de poussière). On a néanmoins constaté :

- Les mauvais résultats des refroidisseurs planétaires dans les fours de grandes dimensions (4 000 t/j) ;
- Les progrès décisifs de la technologie des refroidisseurs à grille ;
- La nécessité de produire l'air tertiaire de 800 à 900 °C pour le précalcinateur, que le refroidisseur planétaire était incapable de fournir.

Ces facteurs ont entraîné un changement de philosophie de la technologie, les refroidisseurs à grille devenant les plus répandus. Cette inversion de la tendance a été, par ailleurs, imputable aux motifs suivants :

- Une nouvelle opportunité technico-économique ;
- Une modification de la technologie des plaques des refroidisseurs à grille conventionnels ;
- Les nouveaux refroidisseurs à grille étaient les seuls qui permettaient d'augmenter les capacités de production.

Refroidisseurs rotatifs (tubulaires)

Le refroidisseur tubulaire applique le même principe que le four rotatif, mais avec un échange de chaleur inverse. Il est disposé à la sortie du four, souvent en configuration inversée, c'est-à-dire qu'un second tube rotatif équipé de son propre actionnement est agencé sous le four. À la sortie du four, le clinker passe à une trémie de transition avant de pénétrer dans le refroidisseur, qui est équipé de plaques de retournement chargées de disperser le clinker dans le flux d'air.

Le débit du flux d'air de refroidissement est déterminé en fonction de l'air nécessaire pour la combustion du combustible. Le rendement du refroidisseur dépend de la vitesse de passage et de sa conception interne. La conception des retourneurs doit tenir compte de l'échange de chaleur et contrôler le cycle de retour de la poudre vers le four. Ce type de refroidisseur ne produit aucun effet de trempe, ce qui est également le cas du refroidisseur planétaire, comme nous l'expliquerons dans la section suivante.

Du point de vue mécanique, ce type de refroidisseur est assez simple (figure 3.2.63.). Il présente cependant deux difficultés de processus s'il est utilisé sur des fours à grande capacité :

- La formation d'accumulations lors de la chute du clinker dans la zone de l'entrée ;
- La fluctuation de la vitesse de l'air dans la zone équipée d'élévateurs.

Le premier de ces problèmes peut être résolu en installant un système automatique de nettoyage, et le second en augmentant le diamètre du tube.

Le tube, dont le rapport longueur/diamètre est de l'ordre de 10 à 1, tourne à une vitesse comprise entre 2,5 et 3,0 tr/mn.

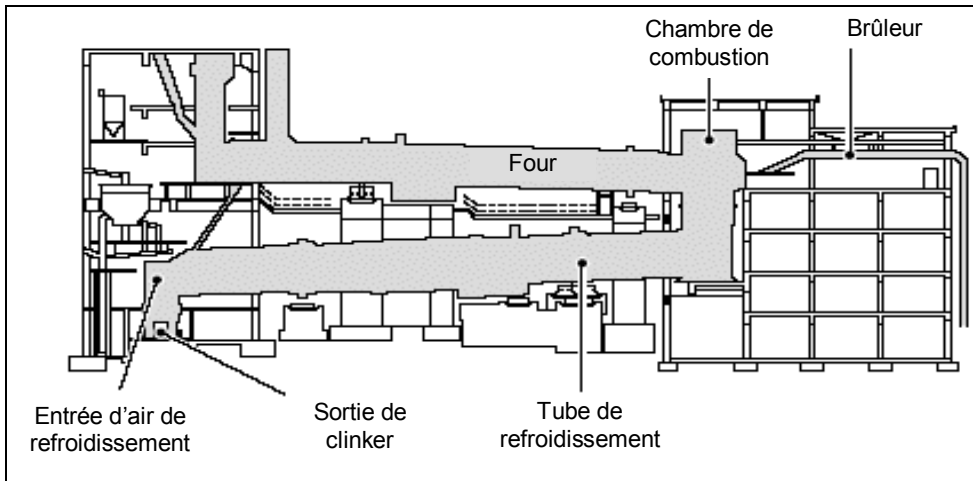
L'équipement intérieur du tube (figure 3.2.64.) se compose de béton ou de briques réfractaires sur environ 60 % de sa longueur.

Les principales dimensions d'un refroidisseur rotatif sont indiquées au tableau 3.2.7.

Tableau 3.2.7. Caractéristiques dimensionnelles théoriques des refroidisseurs rotatifs

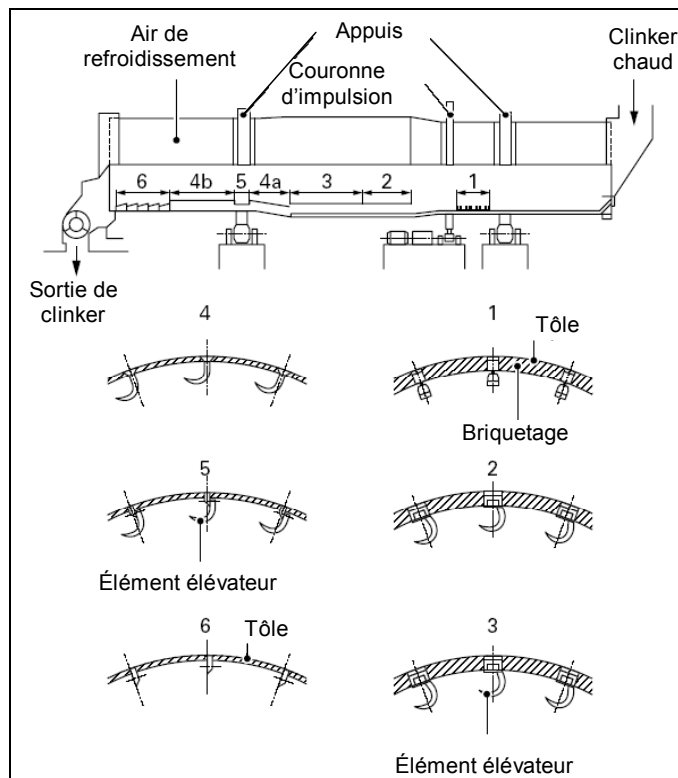
Caractéristiques	Production	
	2 300 t/j	3 200 t/j
Diamètre (m)	4,4-4,8	5,2-5,6
Longueur (m)	46	54

Source : Techniques de l'Ingénieur



Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.63. Refroidisseur rotatif ou tubulaire.



Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.64. Refroidisseur tubulaire. Dispositifs intérieurs d'élévation du clinker.

Refroidisseur planétaire (ou à satellites)

Le refroidisseur planétaire ou à satellites (figures 3.2.65. et 3.2.66.) se compose de plusieurs tubes, typiquement entre 9 et 11, fixés au four rotatif sur l'extrémité du déchargement.

Les refroidisseurs sont reliés au four le long d'une circonférence, le matériau y pénétrant à travers des ouvertures situées sur le four. Le volume d'air de refroidissement est déterminé par l'air nécessaire pour la combustion du combustible. L'air pénètre dans chacun des tubes à partir de l'extrémité du déchargement, en permettant l'échange de chaleur à contre-courant. De même que dans le cas du refroidisseur tubulaire, les dispositifs internes de retournement et de dispersion du clinker sont essentiels.

Chaque tube, dont le rapport longueur/diamètre est d'environ 10:1, est fixé entre 2 appuis, dont l'un est fixe et l'autre coulissant, ce dernier étant placé dans la partie de la sortie de clinker. Le revêtement intérieur des tubes se compose de béton ou de briques réfractaires sur 20% de leur longueur à partir de la bride d'accouplement au tube, le reste se composant de poches et d'élévateurs chargés d'améliorer l'échange thermique.

Ce type de refroidisseur ne présente aucun paramètre d'exploitation variable. L'usure élevée et le choc thermique, en conjonction avec les cycles de poudre à l'intérieur des tubes, sont à l'origine des températures élevées du clinker à la sortie, le taux de récupération de chaleur étant faible. La température de sortie du clinker ne peut être réduite davantage qu'en injectant de l'eau dans les tubes du refroidisseur ou sur leur carcasse.

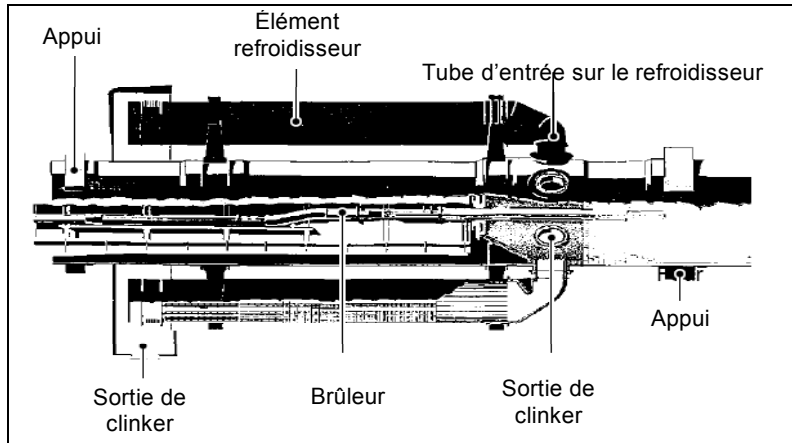
Le refroidisseur planétaire n'est pas valable pour réaliser une précalcination car ce système rend pratiquement impossible l'extraction d'air tertiaire. Il est toutefois possible d'installer un brûleur auxiliaire dans la zone d'entrée du four, dans la partie basse de la tour de préchauffage. Ce brûleur secondaire peut permettre de brûler jusqu'à 25 % du combustible (environ 10 % dans la plupart des cas).

L'intégration d'un refroidisseur à satellites dans une chaîne de cuisson permet de simplifier considérablement le processus, non seulement du point de vue mécanique, mais encore de celui de l'exploitation, à condition que la capacité du four soit moyenne (< 2 500 t/j).

Son avantage le plus important est l'absence d'air excédentaire, ce qui permet de supprimer tous les dispositifs d'épuration qui sont nécessaires dans le cas des refroidisseurs à grille.

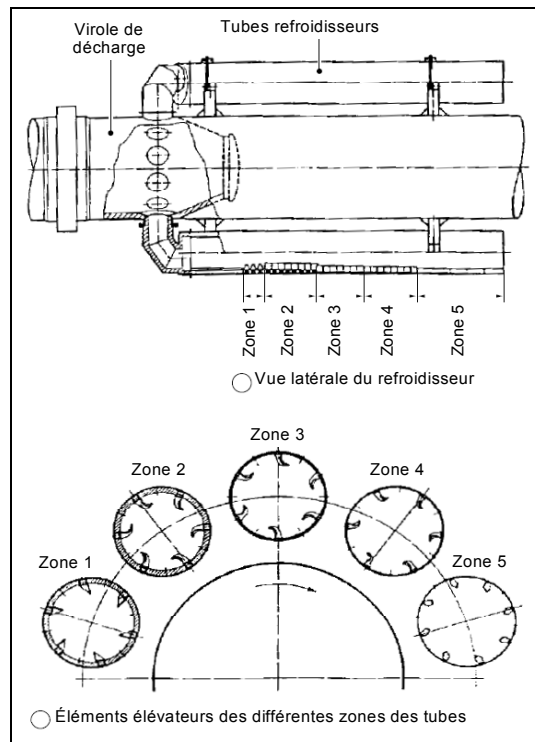
Il présente cependant quelques inconvénients, comme par exemple :

- Le coût de maintenance élevé et le manque de fiabilité au-delà de 2 000 à 2 500 t/j ;
- Le bruit élevé lié à la chute du clinker dans les parties équipées d'élévateurs ;
- L'impossibilité d'augmenter la production au-delà de sa valeur nominale ;
- La température élevée (150 à 300 °C) du clinker à la sortie ;
- L'absence d'effet de trempe du clinker ;
- La tendance à éloigner la cuisson de l'entrée pour éviter des accumulations et des difficultés dans les tubes, mais en créant des cristaux moins réactifs ;
- La baisse du rendement moyen (55 à 65 %) à mesure que l'éloignement du refroidisseur de la zone de cuisson augmente ;
- Le principal inconvénient réside dans l'impossibilité de fournir l'air tertiaire nécessaire pour le précalcinateur, étape généralisée sur tous les nouveaux fours.



Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.65. Refroidisseur planétaire ou à satellites.



Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.66. Emplacement des refroidisseurs.

Refroidisseurs à grille

Dans le cas des refroidisseurs à grille, l'échange se produit par le passage d'un courant d'air ascendant à travers une couche de clinker (lit de clinker) déposée sur une grille perméable à l'air. Les refroidisseurs se classent en fonction de la méthode de convoyage du clinker tout au long de ceux-ci : grille à mouvement coulissant et grille à va-et-vient.

L'air qui n'est pas utilisé dans la combustion est employé à des fins de séchage, par exemple, des matières premières, des additifs du ciment ou du charbon. S'il n'est pas utilisé pour le séchage, cet air doit être épuré avant d'être relâché dans l'atmosphère.

Refroidisseurs à grille coulissante

Dans ce type de refroidisseurs, le clinker est convoyé tout au long d'une grille en mouvement. Cette grille possède les mêmes caractéristiques de conception que la grille du préchauffeur (Lepol). L'air de refroidissement est insufflé dans des compartiments situés sous la grille, à l'aide de ventilateurs. Les avantages de cette conception sont les suivants : une couche homogène de clinker (sans marches d'escalier) et la possibilité de remplacer les plaques sans arrêter le four. En raison de sa complexité mécanique et d'une récupération réduite, imputable à l'épaisseur limitée du lit (à cause de la difficulté d'obtenir une fermeture effective entre la grille et les parois), cette conception a cessé d'être utilisée dans les nouvelles installations à partir de 1980.

Refroidisseurs à grille va-et-vient conventionnels

Le convoyage du clinker dans le refroidisseur à grille va-et-vient se produit par la poussée progressive exercée sur le lit du clinker par les bords d'attaque des files alternées de plaques. Le mouvement relatif des bords d'attaque est généré au moyen d'actionnements hydrauliques ou mécaniques (vilebrequin) connectés toutes les deux files. Le clinker se déplace de la fin de l'alimentation à la fin du déchargement, mais la grille est fixe (figures 3.2.67. et 3.2.68.).

Les plaques de la grille sont fabriquées en acier moulé résistant à la chaleur et leur largeur est généralement de 300 mm. Chaque plaque est perforée pour permettre le passage de l'air.

L'air de refroidissement est également insufflé à travers des compartiments situés sous la grille, au moyen de ventilateurs de 300 à 1 000 mm de pression de colonne d'eau. Ces compartiments sont séparés les uns des autres par des cloisons, pour maintenir le profil de pression. On distingue deux zones de refroidissement :

- Zone de récupération. L'air de refroidissement chaud produit dans cette zone est utilisé pour la combustion dans le brûleur principal (air secondaire) et dans le précalcinateur (air tertiaire) ;
- Zone de refroidissement postérieur, où l'air de refroidissement additionnel refroidit le clinker à des températures plus faibles.

Les plus grandes unités en fonctionnement possèdent une surface active d'environ 280 m² et une capacité de refroidissement de 10 000 t/jour de clinker. Les problèmes caractéristiques de ces refroidisseurs sont la ségrégation et la distribution irrégulière du clinker, ce qui entraîne un déséquilibre air/clinker, une fluidification du clinker fin, des incrustations et une durée de vie réduite des plaques.

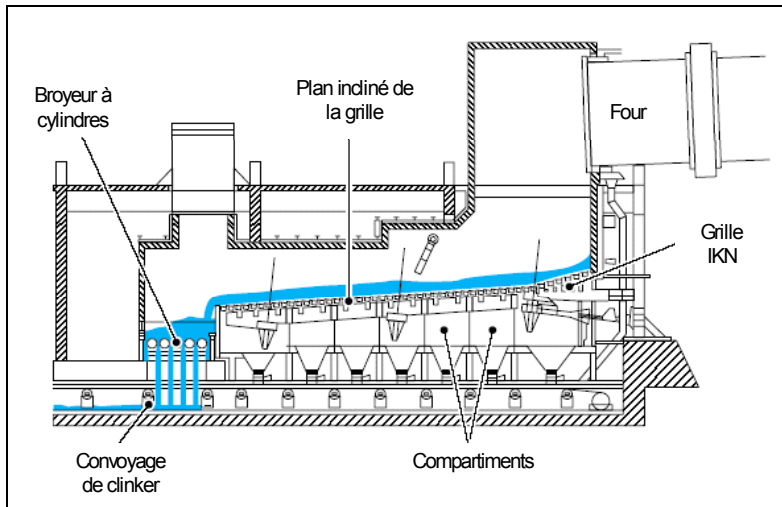
Refroidisseurs à grille va-et-vient modernes

L'apparition et le développement de la technologie moderne des refroidisseurs à grille va-et-vient se sont produits vers 1983 (figure 3.2.69.). Leur conception proposait d'éliminer les problèmes des refroidisseurs conventionnels en obtenant un échange thermique plus proche de l'échange optimal, de même que des refroidisseurs plus compacts employant moins d'air de refroidissement et des systèmes de dépoussiérage plus petits.

Les refroidisseurs à grille va-et-vient modernes couvrent une plage de production comprise entre 1 900 t/j et 9 100 t/j. Les principales caractéristiques de cette technologie sont les suivantes (en fonction du fournisseur) :

- Nouvelles conceptions de plaques, fixes ou mobiles, avec une perte de charge réduite, perméables à l'air mais non au clinker ;
- Aération forcée des plaques ;
- Zones d'aération réglables individuellement ;
- Entrée fixe ;
- Nombre de grilles plus réduit, grilles plus larges ;

- Concasseur à cylindres ;
- Écrans thermiques.



Source : Techniques de l'Ingénieur

Figure 3.2.67. Refroidisseur à grille va-et-vient conventionnel incliné.

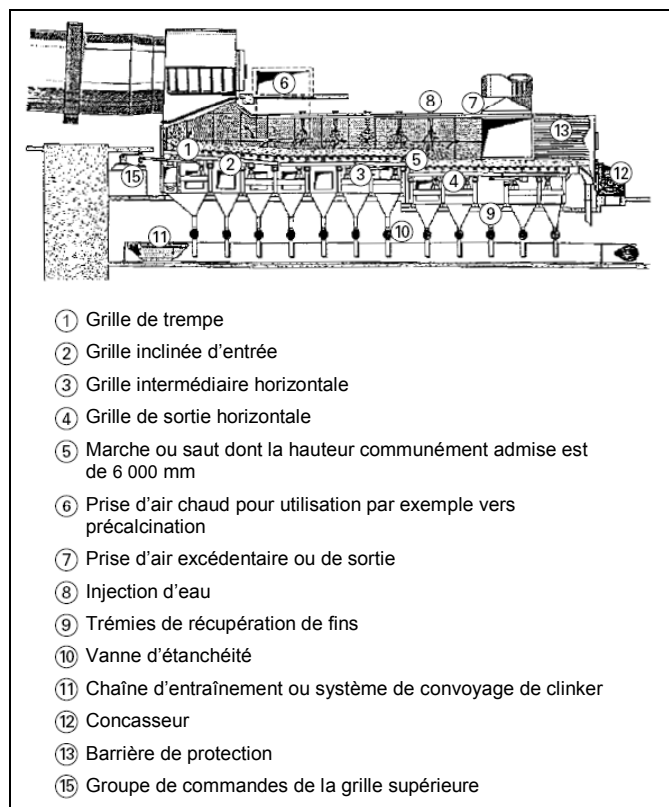
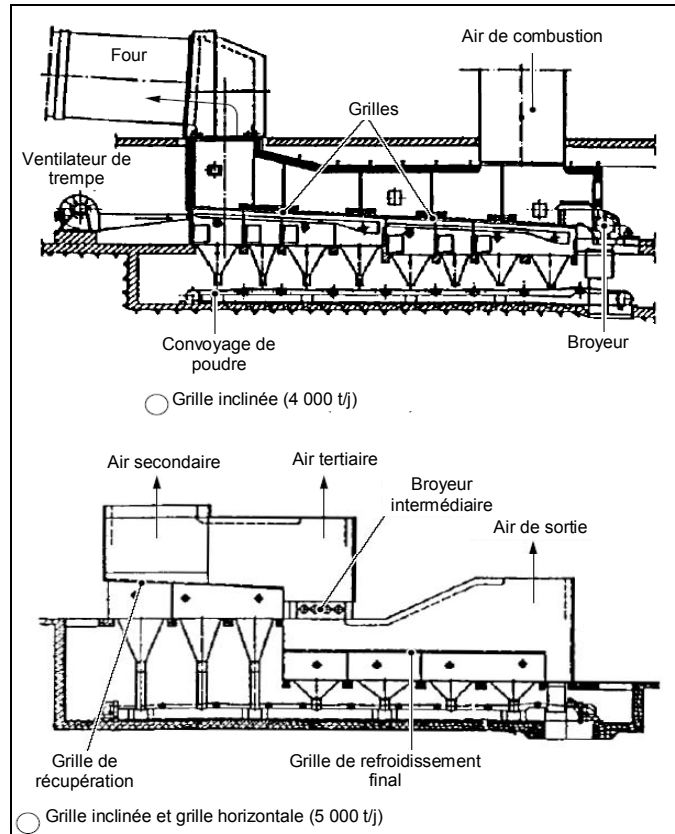


Figure 3.2.68. Coupe longitudinale d'un refroidisseur à grille va-et-vient conventionnel.



Source : *Techniques de l'Ingénieur*

Figure 3.2.69. Refroidisseur à grille va-et-vient moderne.

Autres refroidisseurs (verticaux)

D'autres refroidisseurs ont été développés, comme par exemple un refroidisseur appelé refroidisseur à gravité ou refroidisseur G à installer après un refroidisseur planétaire ou un refroidisseur/récupérateur à grille courte. L'air de refroidissement n'entre jamais en contact avec le clinker, car l'échange thermique s'effectue entre le clinker qui descend sur des tubes en acier transversaux, qui se refroidissent à leur tour grâce à l'air soufflé à travers ces tubes.

Comparaison entre les refroidisseurs de clinker

Le tableau 3.2.8. compare les facteurs suivants pour les trois principaux types de refroidisseurs (à grilles, à satellites et rotatif) :

- Conditions d'exploitation ;
- Coûts d'exploitation ;
- Processus ;
- Coût d'investissement.

En ce qui concerne les coûts de maintenance, les plages indiquées sont très vastes. Dans le cas du refroidisseur à grille, ses coûts directs peuvent varier du simple au double en fonction de l'ancienneté de sa conception ; les coûts indirects (liés au manque de fiabilité) peuvent également être très variables. Dans le cas du refroidisseur planétaire, les conditions d'exploitation revêtent une grande importance ; la stabilité d'un refroidisseur à satellites surchargé (entre 15 et 20 %) au-delà de sa capacité nominale est très réduite, et ses coûts directs et indirects de maintenance peuvent être très élevés.

Tableau 3.2.8. Comparaison des trois types de refroidisseurs.

Critères de comparaison		Refroidisseurs à grille	Refroidisseurs planétaires	Refroidisseurs rotatifs
Conditions d'exploitation	Capacité de production (t/jour)	entre 0 et 10 000	entre 0 et 2 000	entre 0 et 2 000
	Émission de poussière via l'air excédentaire	Possible	Nulle	Nulle
	Bruit	Faible	Élevé	Élevé
Coûts d'exploitation	Rendement (%)	entre 65 et 85	entre 55 et 65	entre 55 et 70
	Consommation électrique (kWh/t de clinker)	entre 6 et 8	entre 2 et 3	entre 2 et 3
	Maintenance	entre 3 et 6	entre 3 et 5	entre 2 et 4
Processus	Flexibilité de la capacité	oui	non	non
	Qualité du clinker (trempe)	oui	non	non
	Récupération de la chaleur du gaz (autres équipements)	Possible	Réalisation limitée	Réalisation limitée
	Récupération de la chaleur du gaz de précalcination	Possible	Impossible	Possible
Investissement	Coûts d'investissement	1	0,6	

Source : Techniques de l'ingénieur, Fours de cimenterie

3.2.5. Broyage et stockage du ciment

Dans le cadre de cette étape, le clinker est mélangé avec le régulateur de prise (plâtre) et avec les éventuels ajouts (laitier de haut-fourneau, fumée de silice, pouzzolane, calcaire, cendres volantes, etc.) et introduit dans les broyeurs en vue de son broyage. Après avoir obtenu la finesse souhaitée, on obtient du ciment. Les proportions de chaque composant dépendent du type de ciment qui est fabriqué.

3.2.5.1. Stockage du clinker

Le clinker et les autres composants du ciment sont entreposés dans des silos ou des hangars fermés.

Les systèmes de stockage de clinker les plus communs sont les suivants :

- Dépôt longitudinal avec déchargement par gravité (figure 3.2.70.).
- Dépôt circulaire avec déchargement par gravité (figure 3.2.71.).
- Silo de stockage de clinker (figure 3.2.72.).
- Silos sphériques de type dôme (figure 3.2.73.).

MÉTHODES DE STOCKAGE DE CLINKER

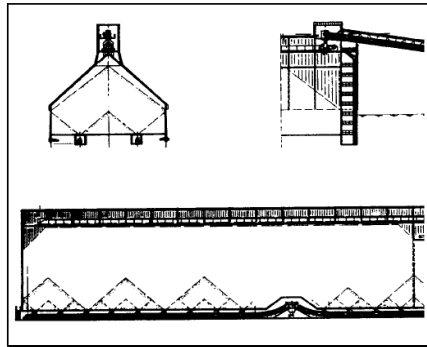


Figure 3.2.70. Stockage longitudinal avec déchargement par gravité.

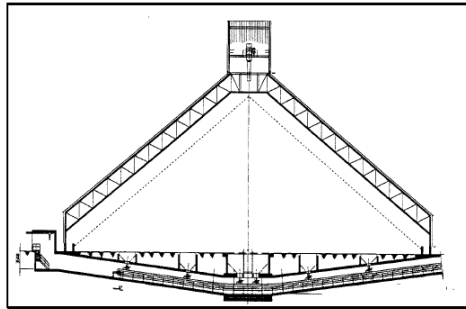


Figure 3.2.71. Stockage circulaire avec déchargement par gravité.

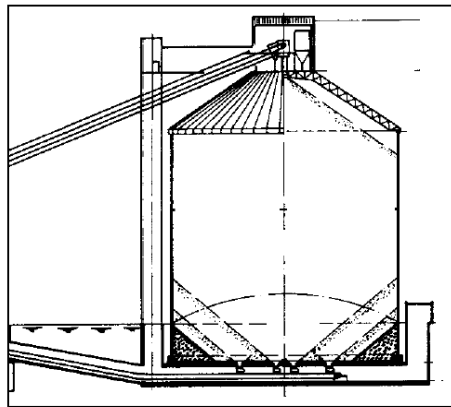


Figure 3.2.72. Silo de stockage de clinker.

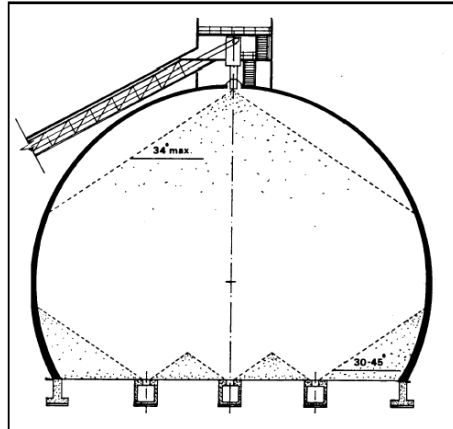


Figure 3.2.73. Silo sphérique de type dôme.



Figure 3.2.74. Silo de clinker.

Les différents composants sont entreposés dans des zones séparées, dosés à l'aide de balances et ajoutés de façon conjointe et continue au broyeur à ciment.

3.2.5.2. Broyeur à ciment

Dans le cadre du procédé de broyage (figure 3.2.75.), les composants sont broyés et mêlés, le matériau passant par des séparateurs (les composants ajoutés peuvent être broyés en même temps que le clinker ou être séchés et broyés séparément). Si le ciment possède les caractéristiques physiques/chimiques nécessaires, il est entreposé dans des silos étanches ; dans le cas contraire, il est renvoyé au broyeur pour poursuivre son broyage.

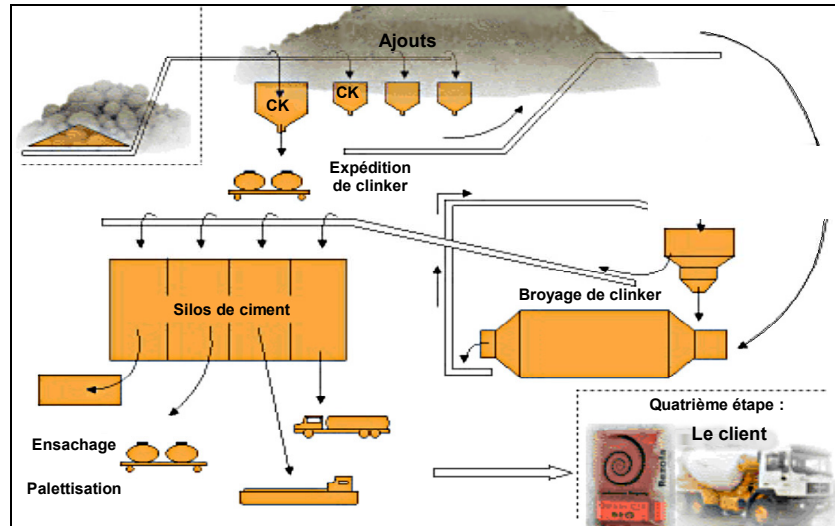


Figure 3.2.75. Procédé de broyage de clinker en vue de l'obtention du ciment.

Les installations de broyage peuvent se trouver à des endroits différents des installations de production du clinker. Le type de broyage du ciment et la conception des installations dépendent du type de ciment à produire. La broyabilité, l'humidité et l'abrasion des composants du ciment produit revêtent une grande importance.

La plupart des broyeurs fonctionnent en circuit fermé, c'est-à-dire qu'ils peuvent séparer le ciment possédant la finesse requise et renvoyer le matériau trop épais au broyeur.

Pesée et dosage de l'alimentation du broyeur

L'exactitude et la fiabilité de la pesée et du dosage des composants qui alimentent le broyeur revêtent une grande importance pour assurer un rendement énergétique élevé du broyage. Les équipements de pesage et de dosage les plus employés sont des balances peseuses sur bande.

Broyage du clinker

En raison de la grande variété de types de ciments demandés sur le marché, la tendance est de nos jours aux systèmes de broyage de dernière génération équipés d'un séparateur dynamique d'air.

Les systèmes de broyage les plus communément appliqués sont les suivants :

- Broyeur à boulets en circuit fermé (le pourcentage d'ajouts est assez limité si ceux-ci ne sont pas secs ou pré-séchés) ;
- Broyeur vertical à cylindres (mieux adapté pour les pourcentages élevés d'ajouts grâce à sa capacité de séchage, également mieux adapté pour le broyage séparé des ajouts) ;
- Presse à cylindres (le pourcentage d'ajouts est assez limité si ceux-ci ne sont pas secs ou pré-séchés).

Autres systèmes de broyage :

- Broyeur à boulets en circuit ouvert ;
- Broyeur à boulets en circuit fermé avec séparateur mécanique d'air à cyclones de générations anciennes ;
- Broyeur horizontal à cylindres.

Le principe de fonctionnement des broyeurs verticaux à cylindres se fonde sur l'action de 2 à 4 cylindres broyeurs, supportés par des bras articulés et montés sur une table horizontale de broyage

ou piste de roulement. Ils sont particulièrement indiqués pour le broyage et le séchage simultanés de matières premières pour ciment ou laitier, car les broyeurs verticaux à cylindres sont capables de traiter des teneurs relativement élevées en humidité dans l'alimentation du broyeur. La durée du séjour du matériau dans le broyeur est suffisamment courte pour prévenir la pré-hydratation du clinker, par exemple en cas de broyage de ciment avec des laitiers.

Comparativement, la presse à cylindres à haute pression nécessite un niveau élevé de maintenance. Les presses horizontales à cylindres sont très souvent employées en série avec les broyeurs à boulets.



Figure 3.2.76. Broyeur à ciment. Cimenterie de Holcim Espagne.

Une évolution plus récente du broyage de ciment est le broyeur à cylindres horizontal. Il se compose d'une carcasse annulaire de grand diamètre et de longueur courte, soutenue par des roulements hydrostatiques ou hydrodynamiques. L'anneau cylindrique tourne sous l'action d'un engrenage circconférentiel. À l'intérieur de l'anneau se trouve un cylindre horizontal qui tourne librement et peut être comprimé hydrauliquement contre le corps cylindrique. Le matériau à broyer est introduit par un ou deux endroits sur le cylindre, et est broyé entre le cylindre et le corps cylindrique. Le matériau broyé qui sort du broyeur est acheminé vers un séparateur et la fraction épaisse est renvoyée au broyeur.

Broyage d'ajouts

Les matériaux susceptibles d'être employés comme composants dans le broyage de ciment (comme ajouts du clinker) possèdent des caractéristiques qui améliorent ses propriétés, comme l'ouvrabilité, la rétention d'eau, la durabilité, la résistance mécanique, la résistance aux sulfates, la résistance au gel, etc. Ces matériaux peuvent être naturels ou provenir de sous-produits d'autres procédés industriels, comme par exemple :

- Les pouzzolanes industrielles ;
- Les cendres volantes de centrales thermiques ;
- Le laitier de haut-fourneau ;
- La fumée de silice de l'industrie des ferro-alliages ;
- Les schistes calcinés ;
- Le sulfate de calcium provenant de la désulfuration de gaz industriels.

Les ajouts, composés minéraux naturels ou industriels, sont généralement broyés avec le clinker et le plâtre.

La décision de broyer les ajouts séparément dépend fondamentalement des facteurs suivants :

- Pourcentage d'ajouts dans le produit final et dans le total de la production de ciment ;
- Disponibilité d'un broyage de remplacement ;
- Différence importante entre la broyabilité du clinker et celle des ajouts ;
- Teneur en humidité des ajouts.

S'il s'avère nécessaire de pré-sécher les ajouts, il existe des systèmes de séchage ayant recours aussi bien aux gaz de combustion du four et/ou à l'air de sortie du refroidisseur, qu'à un générateur indépendant d'air chaud.

Systèmes de broyage combiné

N'importe lequel des systèmes de broyage mentionnés pour le broyage par voie sèche/semi-sèche de matières premières peut être employé pour broyer les ajouts avec le clinker et le plâtre. La plupart des systèmes sont cependant limités par la teneur en humidité du mélange introduit, d'un maximum de 2 %, ou de 4 % en ayant recours à un apport en gaz chauds. Pour des teneurs en humidité supérieures, il est nécessaire de pré-sécher les ajouts dans un sécheur. Les broyeurs verticaux font exception à cette règle, car ils sont capables de traiter des niveaux d'humidité allant jusqu'à 20 %, bien qu'ils nécessitent également un apport en gaz chauds pour le séchage.

Il est souvent nécessaire de recourir à un système séparé d'air/chauffage pour maintenir le matériau sec, en particulier si le laitier possède une teneur en humidité plus élevée, afin d'éviter les pertes de qualité provoquées par la pré-hydratation dans le broyeur.

Dans les cas de la production de ciment portland composé et de ciment de haut-fourneau, l'installation de broyage fonctionne en circuit fermé avec un séparateur d'air. En général, le broyage en circuit ouvert est principalement utilisé pour la production du ciment portland d'une finesse de moins de 3 500 cm²/g.

Systèmes de broyage séparé

Pour broyer séparément les ajouts, les systèmes de broyage par voie sèche/semi-sèche des matières premières peuvent être employés. Dans tous les cas, un pré-séchage est nécessaire si la teneur en humidité du mélange est élevée.

Pendant le broyage simultané de divers composants principaux, la distribution de la taille de particule du ciment dépend de l'aptitude des composants individuels au broyage et du type et de la durée du broyage.

Les procédés de broyage à deux étapes se caractérisent par une combinaison de deux phases de broyage configurées de manières différentes. Ce système offre la possibilité de broyer et de sécher des composants humides tels que le laitier. En outre, un des composants peut être pré-broyé dans la première étape jusqu'à l'obtention de la distribution de taille de particule requise et optimisée pour la seconde étape.

Une configuration possible consiste à broyer séparément les composants principaux, à prévoir le stockage des composants fins et une étape de mélange qui permet de produire un ciment final répondant aux différentes exigences de formulation, réactivité, finesse, distribution de tailles etc.

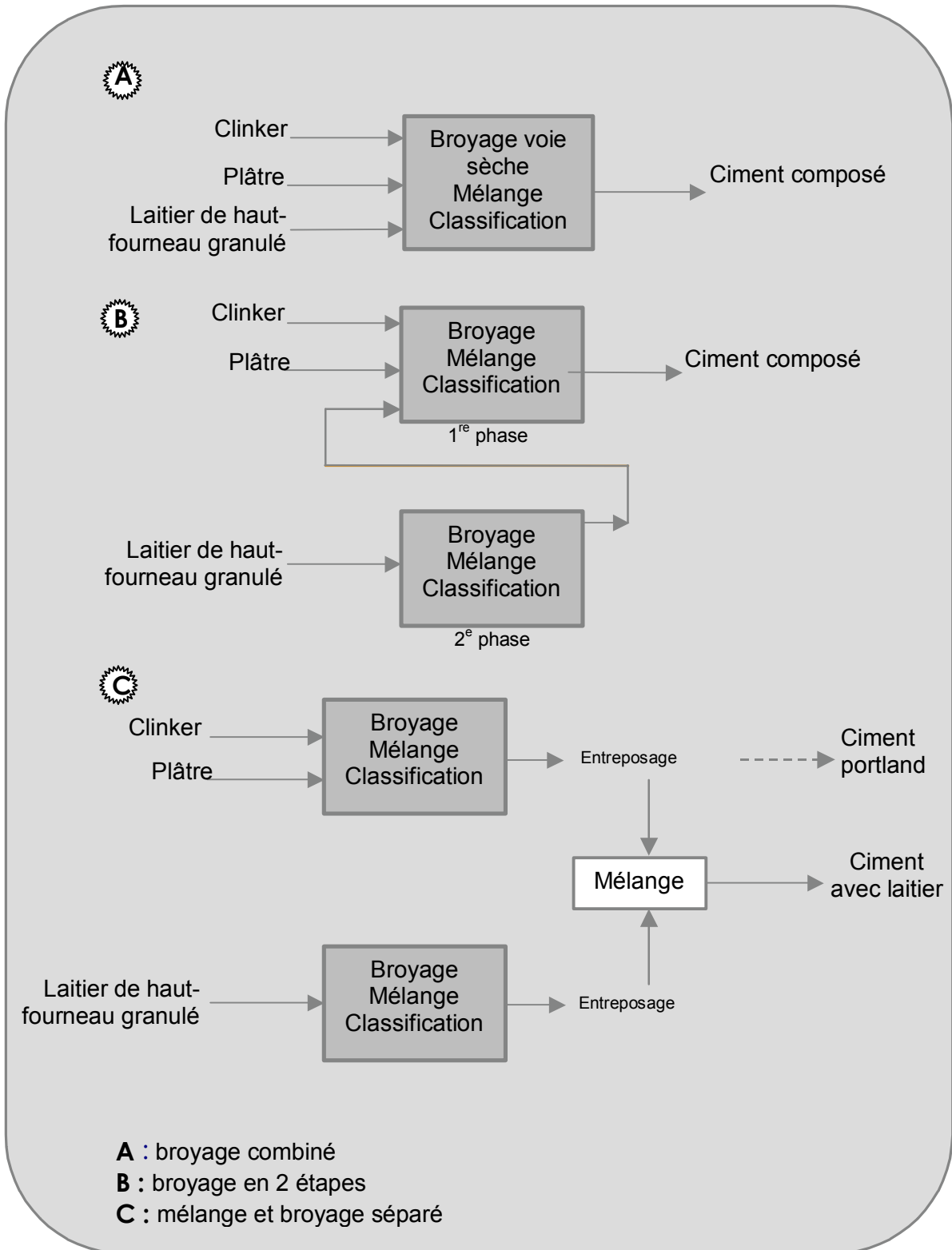


Figure 3.2.77. Principaux procédés technologiques de broyage du ciment.

Séparation par distribution granulométrique des particules

La distribution granulométrique des particules du produit issu du broyage du ciment est d'une grande importance pour la qualité du ciment. La configuration de ces paramètres s'obtient via le réglage du

séparateur. La dernière génération de séparateurs à rotor en cage d'écureuil présente de nombreux avantages par rapport aux conceptions antérieures, comme par exemple :

- Faible consommation spécifique d'énergie (surbroyage plus réduit) ;
- Augmentation de la capacité (efficacité) ;
- Possibilité de refroidir le produit ;
- Plus grande flexibilité pour l'ajustement de la finesse du produit ;
- Meilleur contrôle de la distribution de la taille des particules et, de ce fait, meilleure uniformité du produit.

3.2.5.3. Stockage du ciment

Le ciment est envoyé aux silos de stockage, d'où il est extrait par le biais de systèmes mécaniques et pneumatiques, pour être transporté à l'endroit où il doit être conditionné en sacs de papier ou directement en vrac. Le coût d'investissement des systèmes mécaniques est normalement plus élevé, mais leur coût d'exploitation est beaucoup plus réduit que celui des systèmes de transport pneumatique.

Le système le plus fréquemment employé est une combinaison de convoyeurs de produits fluidifiés ou à vis et d'élévateurs à godets.

En général, plusieurs silos sont nécessaires pour entreposer les différents ciments. Mais les silos de dernière génération permettent d'entreposer plus d'un type de ciment dans un même silo.

Les configurations les plus courantes des silos sont les suivantes :

- Silo à cellule unique avec trémie de déchargement.
- Silo à cellule unique avec cône central.
- Silo multicellulaire.
- Silo dôme avec cône central.

On emploie de l'air comprimé pour lancer et maintenir le procédé de déchargement du ciment des silos, en injectant celui-ci dans le silo à travers des unités d'aération situées au fond de ces derniers.

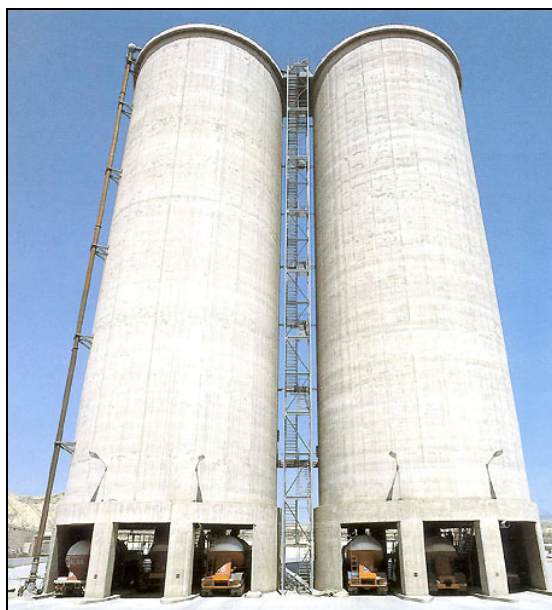


Figure 3.2.78. Silos à ciment. Uniland Cementera. Espagne.

3.2.6. Produits de ciment

3.2.6.1. Propriétés et types de ciments

L'industrie du ciment produit les types et catégories de ciment, obtenus par différents mélanges de matières premières, tels qu'ils sont demandés par le marché. Les progrès économiques et industriels, les sources de matières premières et les conditions climatiques ont entraîné dans leur sillage divers progrès en ce qui concerne les méthodes de construction et les matériaux de construction et, par conséquent, les divers types de ciments, en fonction des caractéristiques physiques et chimiques et des applications finales requises.

Caractéristiques physiques et chimiques

Avant de décrire ces caractéristiques, il est nécessaire de définir ce qui est connu comme l'indice d'hydraulicité. Cet indice est un nombre obtenu en déterminant le rapport entre les composants acides et basiques du ciment. $I = \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SO}_3 \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$.

Si cette valeur est comprise entre 0,65 et 1,20, on dit qu'il s'agit d'un ciment à prise rapide, c'est-à-dire mettant moins d'une heure à prendre. Si, en revanche, cette valeur est comprise entre 0,50 et 0,65, le ciment est alors à prise lente, soit une durée supérieure à 8 heures.

Les caractéristiques physiques et mécaniques les plus importantes des ciments sont les suivantes :

Finesse de broyage

Cette caractéristique est intimement liée à la valeur d'hydraulicité du ciment, car elle affecte de façon décisive la rapidité des réactions chimiques qui se produisent pendant la prise de ce dernier et son premier durcissement. Au contact de l'eau, les grains de ciment s'hydratent uniquement à une profondeur de 0,01 mm et, si ces grains sont très épais, leur rendement est par conséquent très réduit, car leur intérieur contient un noyau pratiquement inerte. Si le ciment possède une finesse excessive, son retrait et sa chaleur de prise sont très élevées (ce qui s'avère en général négatif) ; le liant est plus enclin à la météorisation (vieillessement) après un stockage prolongé, et sa résistance aux eaux agressives se réduit.

Puisque les résistances mécaniques augmentent avec la finesse, il est nécessaire d'adopter une solution de compromis : le ciment doit être finement broyé, mais pas excessivement. De préférence, un ciment doit posséder les résistances souhaitables à ses différents âges, en raison de la qualité du clinker plutôt que pour des motifs de finesse de broyage.

Expansion

À long terme, ce phénomène est dû à l'existence excessive de chaux libre ou de magnésium. Il est impératif de procéder à une mesure de cette caractéristique du ciment avant la construction de l'ouvrage, afin d'éviter des accidents tragiques.

Résistances mécaniques

On entend par résistance du ciment celle d'un mortier normalisé conformément aux normes en vigueur. Cette propriété est très importante, mais elle agit souvent comme une arme à double tranchant, car elle a tendance à s'opposer à la durabilité.

Prise et durcissement

Il s'agit sans aucun doute de la principale caractéristique du ciment et la plus importante pour sa mise en œuvre. La prise se produit en raison de l'ajout d'eau, qui provoque l'hydrolyse de certains

composants et des hydratations et recombinaisons ultérieures, après lesquelles le ciment acquiert la dureté de la pierre. L'hydratation du ciment s'effectue en deux temps :

1. Prise : pendant la prise, la masse plastique devient de plus en plus rigide (durée comprise entre quelques minutes et 18 heures) ;
2. Durcissement : la masse rigide augmente sa dureté et sa résistance mécanique (il dure 28 jours, mais on a constaté qu'il se poursuit pendant plusieurs années). Ce phénomène comporte un certain nombre de réactions complexes (voir section 3.2.8. *Mise en œuvre du ciment*).

Ciments communs

En raison de l'existence d'un grand nombre de types de ciments, il a été considéré nécessaire de séparer les « ciments communs » des « ciments à caractéristiques spéciales ».

Les ciments communs sont ceux qui sont valables pour les applications structurelles et qui peuvent en outre être utilisés dans des applications non structurelles dans le bâtiment. Une partie du ciment peut être constituée par des ajouts minéraux provenant d'origines naturelles ou industrielles. Ces ajouts minéraux peuvent posséder différentes caractéristiques :

- Hydrauliques (laitier de haut-fourneau) ;
- Pouzzolaniques (roches volcaniques, cendres volantes, micro-silice, argile calcinée) ;
- Remplissage (pierre calcaire).

En termes généraux, en fonction des caractéristiques des minéraux ajoutés, on distingue cinq types principaux de ciment commun :

- Ciment portland ;
- Ciment portland composé ;
- Ciment de hauts fourneaux ;
- Ciment pouzzolanique ;
- Ciment composé.

Ciment portland

Le ciment portland est un ciment hydraulique produit par le mélange et le broyage du clinker avec un léger pourcentage de plâtre ou d'anhydrite (sulfate de calcium) naturelle ou industrielle, qui agit comme régulateur du procédé de durcissement, et qui contient généralement une ou plusieurs des formes de sulfate de calcium en tant qu'ajout pendant le broyage. Ce type de ciment, à prise lente, est utilisé pour les préfabriqués et les bétons à haute résistance.

Ciment portland composé

Il s'agit d'un ciment portland doté d'ajouts. Il contient entre 6 et 35 % d'autres composants principaux en plus du clinker. C'est un type de ciment intermédiaire entre le précédent et le ciment portland pouzzolanique et le ciment de hauts fourneaux (au laitier de hauts fourneaux), un échelonnement continu étant admis entre l'un et l'autre. Il est employé pour fabriquer du béton armé et du béton non armé.

Ciment de hauts fourneaux

Ces ciments correspondent à des ciments à pourcentage élevé de laitier de haut-fourneau, qui agit, en conjonction avec le clinker, comme liant hydraulique. Le laitier granulé de haut-fourneau est le sous-produit du traitement de minerais de fer dans le haut-fourneau qui, pour être utilisé dans la

fabrication de ciment, doit être transformé en granules par refroidissement rapide et doit, en outre, posséder une composition chimique adaptée. Il est bon marché mais prend et durcit lentement.

C'est un bon ciment pour les grands massifs, mais il est contre-indiqué dans des environnements à faible température, qui retardent encore davantage la prise. Il ne doit pas être employé à des températures $T < 5\text{ °C}$. Il prend une couleur verdâtre, à prendre en considération pour le béton visible. Il a besoin d'humidité pendant environ deux semaines, la chaleur et la sécheresse étant ses grands ennemis.

Ciment pouzzolanique

Le ciment qui contient de la pouzzolane s'obtient par la pulvérisation d'un mélange conjoint de clinker portland et de pouzzolane avec l'ajout éventuel du sulfate de calcium. La teneur en pouzzolane peut être comprise entre 15 % et 50 % du poids total. La pouzzolane est un matériau siliceux ou siliceux/alumineux qui, en lui-même, peut n'avoir que peu d'activité hydraulique ou aucune, mais qui, finement divisé et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à des températures ordinaires, pour former des composés qui possèdent des propriétés hydrauliques.

Ciment composé

Les ciments composés sont des agglomérants qui contiennent, en plus de clinker de ciment Portland et de plâtre, un ou plusieurs des matériaux suivants : un matériau hydraulique latent, généralement un laitier de haut-fourneau granulé, des composants hydrauliques pouzzolaniques telles que la pouzzolane naturelle, de la cendre volcanique, des fumées de silice, de l'argile calcinée, etc., et/ou des additifs inertes, c'est-à-dire du calcaire dans la plupart des cas. Ils donnent des bétons lents, à faible retrait et faible résistance, et ne sont pas valables pour le béton armé.

Tableau 3.2.9. Principaux types de ciments.

Types	Appellation	Désignation
CEM I	Ciment portland	CEM I
CEM II	Ciment portland au laitier	CEM II/A-S
		CEM II/B-S
	Ciment portland à la fumée de laitier	CEM II/A-D
	Ciment portland à la pouzzolane	CEM II/A-P
		CEM II/B-P
		CEM II/A-Q
		CEM II/B-Q
	Ciment portland à la cendre volante	CEM II/A-V
		CEM II/B-V
		CEM II/A-W
		CEM II/B-W
	Ciment portland aux schistes calcinés	CEM II/A-T
		CEM II/B-T
	Ciment portland au calcaire	CEM II/A-L
		CEM II/B-L
		CEM II/A-LL
CEM II/B-LL		
Ciment portland composé	CEM II/A-M	
	CEM II/B-M	
CEM III	Ciment au laitier de haut-fourneau	CEM III/A
		CEM III/B
		CEM III/C
CEM IV	Ciment pouzzolanique	CEM IV/A
		CEM IV/B
CEM V	Ciment composé	CEM V/A
		CEM V/B

Ciments à caractéristiques spéciales

Il s'agit en réalité des ciments généraux présentés ci-dessus, mais complétés par certaines propriétés qui les dotent d'une utilité particulière dans certaines applications spéciales.

Ciments résistants aux sulfates

Les ciments résistants aux sulfates sont utilisés pour les structures en béton exposées à l'agression de sulfates solubles dans les eaux souterraines, les eaux superficielles et les sols. Les ciments portland à faible teneur en C_3A (moins de 3 %) et les ciments au laitier de haut-fourneau avec au moins 65 % de laitier granulé ont suffisamment fait leurs preuves en Europe et dans d'autres pays du monde et garantissent les exigences de résistance chimique. L'utilisation de ces ciments dépend des conditions environnementales régionales.

Ciments à faible chaleur d'hydratation

Les ciments à faible chaleur d'hydratation sont utilisés dans les grandes structures en béton et se caractérisent par le fait de produire une chaleur faible pendant l'hydratation.

La chaleur d'hydratation provoque une augmentation de la température du béton qui peut entraîner une tension et l'apparition de fissures. La principale caractéristique de ces ciments est un développement initial plus faible de la résistance.

Ciments à faible teneur alcaline

Les ciments à faible teneur alcaline sont utilisés dans la production de béton contenant des granulats capables de réagir avec des alcalis (granulats contenant du SiO_2 , comme l'opale, le silex, certains minéraux silicatés, les fumées volcaniques, etc.). La réaction est connue sous le nom de réaction alcali-silice et provoque l'expansion et, éventuellement, le craquellement. Ces ciments sont utilisés dans des conditions climatiques humides. Ils se définissent globalement comme des ciments dont la teneur maximale en alcali est inférieure à 0,6 % (calculée comme Na_2O équivalent), alors que des teneurs de 2 % peuvent être considérées comme acceptables pour le ciment portland.

Ciments à l'aluminate de calcium

Il s'agit de ciments dont la teneur en Al_2O_3 est comprise entre 36 et 55 %, ce composé étant un liant hydraulique qui se solidifie et durcit du fait de l'hydratation des aluminates. Le composant principal est l'aluminate monocalcique anhydre ($\text{CaO Al}_2\text{O}_3$, CA). Leurs caractéristiques hydrauliques se fondent principalement sur l'hydratation du CA. Le développement rapide de la résistance (de plus de 20 N/mm^2 après 6 h et supérieure à 40 N/mm^2 après 24 h), de même que le comportement de durcissement normal (> 60 minutes, similaire au ciment portland), et une résistance chimique élevée des mortiers denses et des bétons, sont les principales caractéristiques de ce ciment. Une augmentation de la teneur en Al_2O_3 entraîne une augmentation de la résistance réfractaire.

Leurs résistances à court terme sont supérieures à celles du ciment portland même si, à long terme, elles sont inférieures en raison de l'effet de conversion (formation d'aluminate de calcium hydraté qui donne lieu à une porosité plus élevée). Ces ciments sont plus stables en présence d'eaux agressives et de mer que le ciment portland. Il est nécessaire de porter davantage d'attention à la sélection des granulats et des additifs que dans le cas du ciment portland normal. Les revêtements peuvent être inférieurs, grâce à la plus grande protection contre la corrosion garantie par la libération d'alcalis de ces ciments.

Autres ciments

Il existe de nombreux autres types de ciments dont les caractéristiques sont souvent mises à profit dans un but spécifique. Dans la plupart des cas, ils ne sont pas standardisés s'ils ne peuvent pas être mis sur le marché dans le cadre d'une législation nationale. Certains exemples sont décrits ci-dessous :

Les ciments super-sulfate. Ils se composent de laitier de haut-fourneau d'une teneur en anhydrite d'au moins 5 % (CaSO_4), et de 5 % au maximum de clinker de ciment portland. L'emploi de ce ciment imperméable est avantageux, par exemple, pour le compactage de sols. Le ciment imperméable est un ciment portland commun contenant de petites quantités de substances imperméables ajoutées lors du broyage à des températures élevées.

Les ciments pour puits de pétrole. Ils sont utilisés pour cimenter le revêtement en acier des parois de la perforation des puits de gaz et de pétrole, pour en créer le revêtement et sceller les formations poreuses. Il s'agit de ciments portland et pouzzolaniques qui prennent même à des températures et à des pressions élevées, grâce à leur composition.

Le ciment à prise régulée. Il prend rapidement et durcit également très rapidement grâce à sa teneur élevée en composé $11 \text{ CaO} \cdot 7 \text{ Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaFe}_2$.

Le ciment expansif. Il contient généralement de grandes quantités d'aluminates et de sulfates. Le ciment se dilate en durcissant, en raison de la formation de l'ettringite.

Les ciments de maçonnerie. Le ciment de maçonnerie est un liant hydraulique finement broyé, produit en usine et composé essentiellement de clinker de ciment portland pour développer sa résistance mécanique.

Ciments blancs. La blancheur du ciment est normalisée pour recevoir cette qualification.

3.2.7. Ensachage et expédition

Le ciment a longtemps été livré en sacs de papier (figure 3.2.79.). La tendance actuelle est cependant à la livraison en vrac (figure 3.2.80.), en le transportant dans des camions citernes. Le ciment peut être envoyé à destination par transport routier ou maritime.



Figure 3.2.79. Transport de ciment en sacs.



Figure 3.2.80. Système de chargement de ciment en vrac.

Transport en vrac

Les avantages de l'achat de ciment en vrac sont nombreux, notamment :

- Économie lors de l'achat du ciment ;
- Économie lors de la manutention du déchargement, du stockage et de la manipulation ;
- Économie de pertes dues à des sacs détériorés ou mouillés ;
- Augmentation de la productivité du chantier, le ciment étant disponible immédiatement ;
- Élimination du risque de vol.

Par ailleurs, du point de vue de l'économie sociale, il représente pour le pays une épargne de devises en réduisant les importations de matières premières pour la fabrication de son conditionnement.

Le véhicule de transport du ciment est une citerne sous pression, le produit étant chargé dans les silos de stockage par gravité, et il est équipé d'un compresseur utilisé pour décharger le matériau. Le chauffeur manœuvre les commandes pour assurer un mélange d'air et de ciment adéquat pour acheminer le matériau vers le silo du chantier.

Les premiers véhicules de transport en vrac possédaient une conception de double cône, avec un dispositif de déchargement central et un dispositif d'aération situé tout au long de l'intérieur du récipient. En raison de la géométrie du cône, ils n'étaient appropriés que pour décharger des produits pouvant être fluidifiés.

Par la suite, en raison de la nécessité d'augmenter la capacité et de concevoir des véhicules polyvalents capables de transporter une plus grande quantité de produits, leur conception s'est améliorée pour permettre de les adapter à divers usages, y compris le transport de liquides (des produits inflammables aux solides granulés), en transformant les systèmes de vannes et de ventilation du réservoir. Les véhicules sont classés comme citernes, remorques ou une combinaison de ces deux éléments.

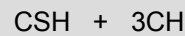
3.2.8. Mise en œuvre du ciment

En gâchant à l'eau le ciment ou ses mélanges avec du sable (mortier) et de la pierre (béton), la pâte plastique obtenue commence à perdre cette propriété après un certain temps – une heure par exemple – et finit par se transformer en une masse totalement rigide, même si elle n'est pas encore résistante, au bout de trois ou quatre heures.

Ce phénomène d'hydratation se compose de deux phases : prise et durcissement. Pendant la prise, les composants du ciment les plus facilement et rapidement solubles dans l'eau se dissolvent dans la phase liquide de la pâte. Ce procédé se déroule en dégageant de la chaleur, et la pâte perd peu à peu sa plasticité pour devenir rigide, jusqu'à ce qu'elle se consolide finalement totalement. Pendant le durcissement qui se produit ensuite et dure beaucoup plus longtemps (des jours, des mois ou même des années), les procédés d'hydratation se poursuivent à un rythme continu mais décroissant, à mesure qu'augmentent progressivement la rigidité, la dureté et les résistances mécaniques de la pâte en dissipant la chaleur d'hydratation.

En gâchant le ciment avec de l'eau, il peut se produire un effet appelé « fausse prise », consistant en un durcissement prématuré de la masse, qui se produit entre une et cinq minutes après le début du gâchage. Ce phénomène n'altère pas les propriétés du ciment et est par conséquent inoffensif ; il se résout en poursuivant le gâchage du ciment.

Les principales réactions d'hydratation sont les suivantes :

Pour C₃S

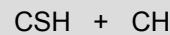
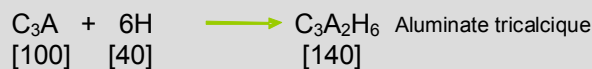
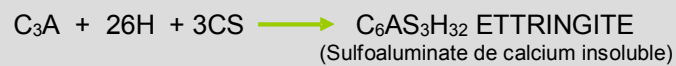
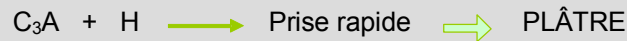
Silicate de calcium hydraté
TORBERMORITE (gel)

Hydroxyde de calcium
(alcalinité)

Pour C₂S

[100] [21]

[99] [22]

**Pour C₃A**

[100] [40]

[140]

Pour C₄AF

[100]

[37]

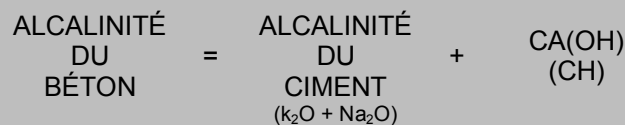


Figure 3.2.81. Procédé d'hydratation du ciment.

Les premières réactions sont celles des composants non silicatés, et sont responsables du comportement lors de la prise. La phase qui durcit est le disilicate tricalcique hydraté, ou gel de tobermorite (découvert à Tobermory, Écosse). Sa rigidité et résistance finale dépendent de la quantité d'eau présente et de la température. Puisqu'elle forme une dispersion colloïdale (gel), la tobermorite enveloppe les particules d'hydroxyde de calcium, d'hydroxyde d'aluminium et les grains de clinker non hydrolysés en les protégeant de l'action initiale de l'eau.

Pendant le durcissement, les réactions se poursuivent, et les réactifs se rassemblent pour former une masse compacte de particules. Pour que cette étape de la réaction se produise, l'eau nécessaire est cédée par le gel, qui devient dur et imperméable. Les particules du cristal formé s'entrecroisent en remplissant les pores du gel de tobermorite, ce qui ordonne la structure.

3.2.9. Contrôle de qualité

Le contrôle de qualité commence dès la sélection des matières premières conformément à leur composition chimique, et se poursuit lors du dosage et du broyage pour garantir que la préparation du mélange est adéquate pour se calciner, en s'assurant de l'obtention des composés chimiques nécessaires à la fabrication du ciment requis. Dans le cadre du broyage final, il est nécessaire de vérifier si le produit répond à des paramètres de qualité tels que la résistance à la compression, l'ouvrabilité, etc., afin de satisfaire aux dispositions de la politique de qualité.

4. PROBLÉMATIQUES ENVIRONNEMENTALES DANS LA FABRICATION DU CIMENT : FLUX DE DÉCHETS ET CONSOMMATIONS

Il existe différentes problématiques environnementales issues des processus de fabrication du ciment, mais elles dépendent en grande partie des matières premières et des combustibles utilisés, ainsi que des processus mis en œuvre dans ladite industrie.

Les aspects environnementaux associés à l'industrie du ciment peuvent être divisés en deux groupes : ceux qui sont associés à l'étape d'extraction des matières premières et ceux qui sont associés aux étapes de production du clinker et du ciment.

Les aspects environnementaux associés à l'extraction des matières premières regroupent principalement la détérioration des paysages et du milieu naturel, le bruit, les vibrations et la poussière produite par les explosions, et les activités de la carrière elle-même. Concernant ces aspects, il convient de souligner qu'actuellement, l'extraction de minéraux ne se limite plus à couvrir les besoins en ressources, mais que cette activité cherche également à se faire accepter par la société en général, d'un point de vue environnemental. Il existe un autre aspect environnemental indirect associé aux exploitations, c'est celui du transport des matières premières entre la carrière et l'usine de production (principalement consommation d'énergie, émissions des véhicules, émissions diffuses de particules dans l'atmosphère et bruit), raison pour laquelle, autant d'un point de vue environnemental qu'économique, il est très important que l'usine de production se situe le plus près possible de l'exploitation.

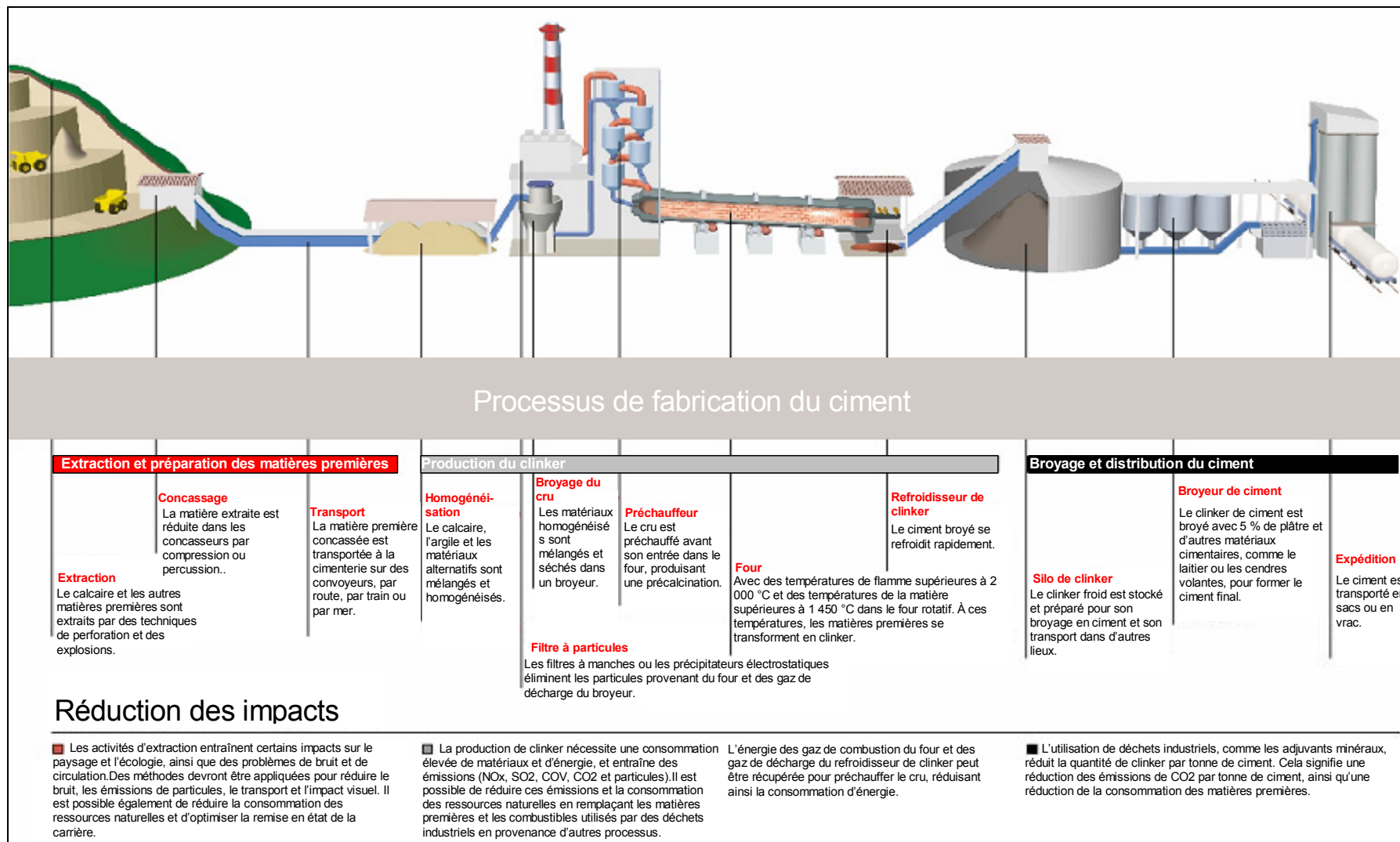
Les principaux aspects environnementaux associés à la production de clinker et de ciment sont les émissions dans l'atmosphère (poussière, NO_x, SO₂, CO₂, COV, etc.) et la consommation d'énergie.

Les eaux résiduaires sont limitées aux eaux de pluie, au refroidissement des équipements (normalement en circuit fermé) et aux eaux usées ; le stockage et la manipulation des combustibles représentent également des sources potentielles de pollution des sols et des nappes phréatiques.

Ce chapitre détaille les flux de déchets (pollution atmosphérique, déchets liquides et résidus) ainsi que la consommation en énergie et en eau des principaux processus de fabrication du ciment.

Dans certains cas, certaines options de gestion particulières sont proposées mais elles devront être toujours examinées par rapport aux directives de gestion des flux de déchets définies dans chaque pays et dont la mise en œuvre est obligatoire pour certaines d'entre elles.

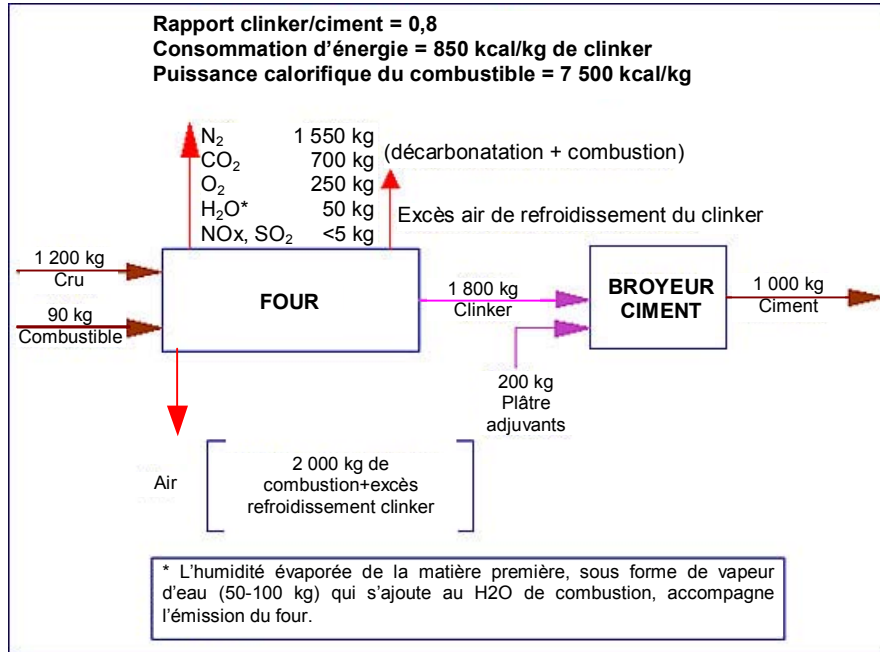
Afin de faciliter la compréhension de ce qui est décrit dans les différentes sections de ce chapitre, voici un schéma illustrant le processus de fabrication du ciment et les impacts environnementaux associés :



Source : schéma adapté d'une figure originale de Holcim.

Figure 4.0.1. Schéma du processus de fabrication du ciment et impacts environnementaux associés.

Voici un bilan des masses pour une tonne de ciment et un tableau récapitulatif des principaux polluants générés, en fonction de l'étape du processus de production :



Source : Oficemen.

Figure 4.0.2. Bilan des masses pour une tonne de ciment.

Tableau 4.0.1. Principaux polluants en fonction de l'étape du processus de production.

Source de la pollution	Part	SO _x	NO _x	CO _x	COV	Métaux	Halogènes	Dioxines et furannes	NH ₃	S.S.	pH
Préparation et stockage de la matière première	A										
Préparation et stockage des combustibles	A										
Four	A	A	A	A	A	A	A	A			
Refroidisseur de clinker	A										
Broyage du ciment	A										
Stockage du ciment	A										
Drainage										W	W

A : dans l'air, W : dans l'eau, L : dans le sol.

Source : Cembureau.

4.1. SOURCES POTENTIELLES DE POLLUTION ATMOSPHERIQUE

4.1.1. Principales émissions dans l'atmosphère

L'industrie du ciment émet dans l'atmosphère une série de polluants qui peuvent provenir de sources ponctuelles ou diffuses (figure 4.1.1.)

Les émissions provenant de sources ponctuelles sont générées pendant tout le processus de production (combustion, broyage et séchage) et se caractérisent par le fait d'être canalisées à travers conduits et cheminées. Les principaux composés polluants générés sont les suivants :

- Particules solides ;
- Oxydes d'azote ;
- Dioxyde de soufre.

En outre, il existe d'autres composés émis par ces mêmes sources, en fonction des caractéristiques du processus :

- Dioxyde de carbone ;
- Monoxyde de carbone ;
- Composés organiques volatils ;
- Acide chlorhydrique ;
- Acide fluorhydrique ;
- Dioxines et furannes ;
- Métaux lourds.

Les émissions provenant de sources diffuses, en revanche, ne sont pas canalisées et ne sont pas associées à des processus de combustion, ni de broyage ni de séchage, mais liées simplement aux opérations comme le chargement ponctuel des camions par des pelles excavatrices, l'empilement du calcaire, la circulation des véhicules sur des pistes non carrossables, ou l'action érosive du vent sur les matériaux à l'air libre.

Ces opérations émettent principalement dans l'atmosphère des particules solides, comme seul polluant.

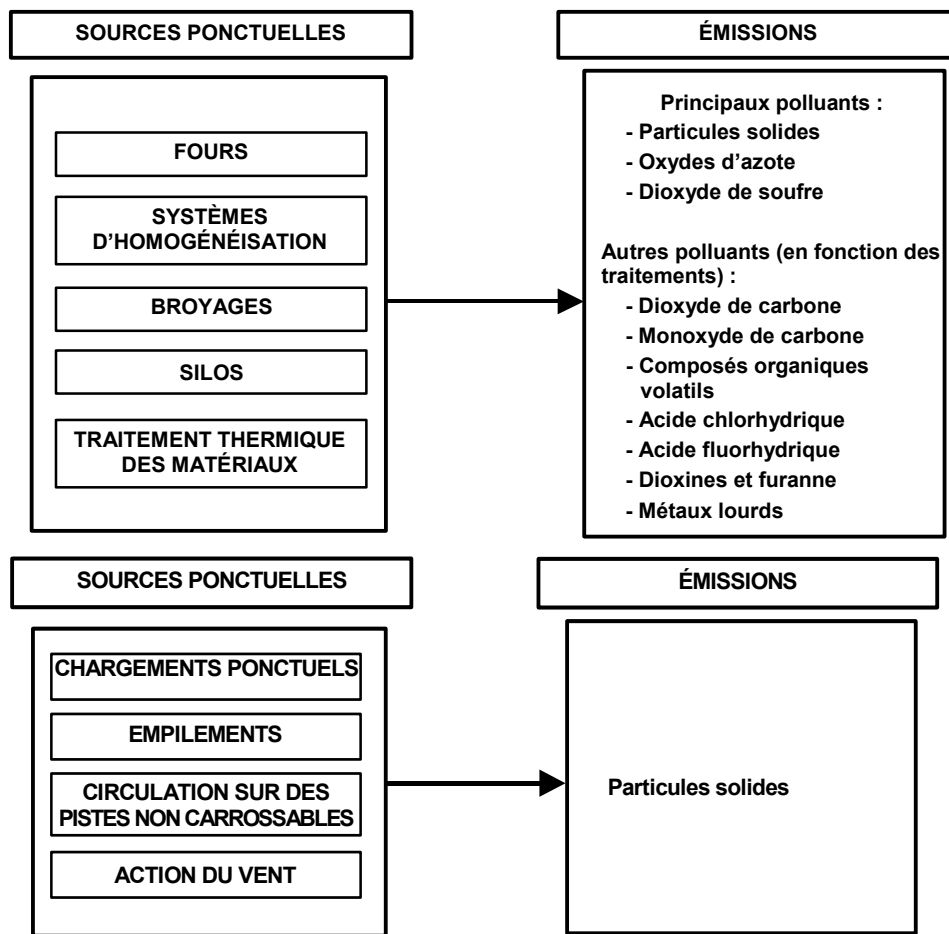
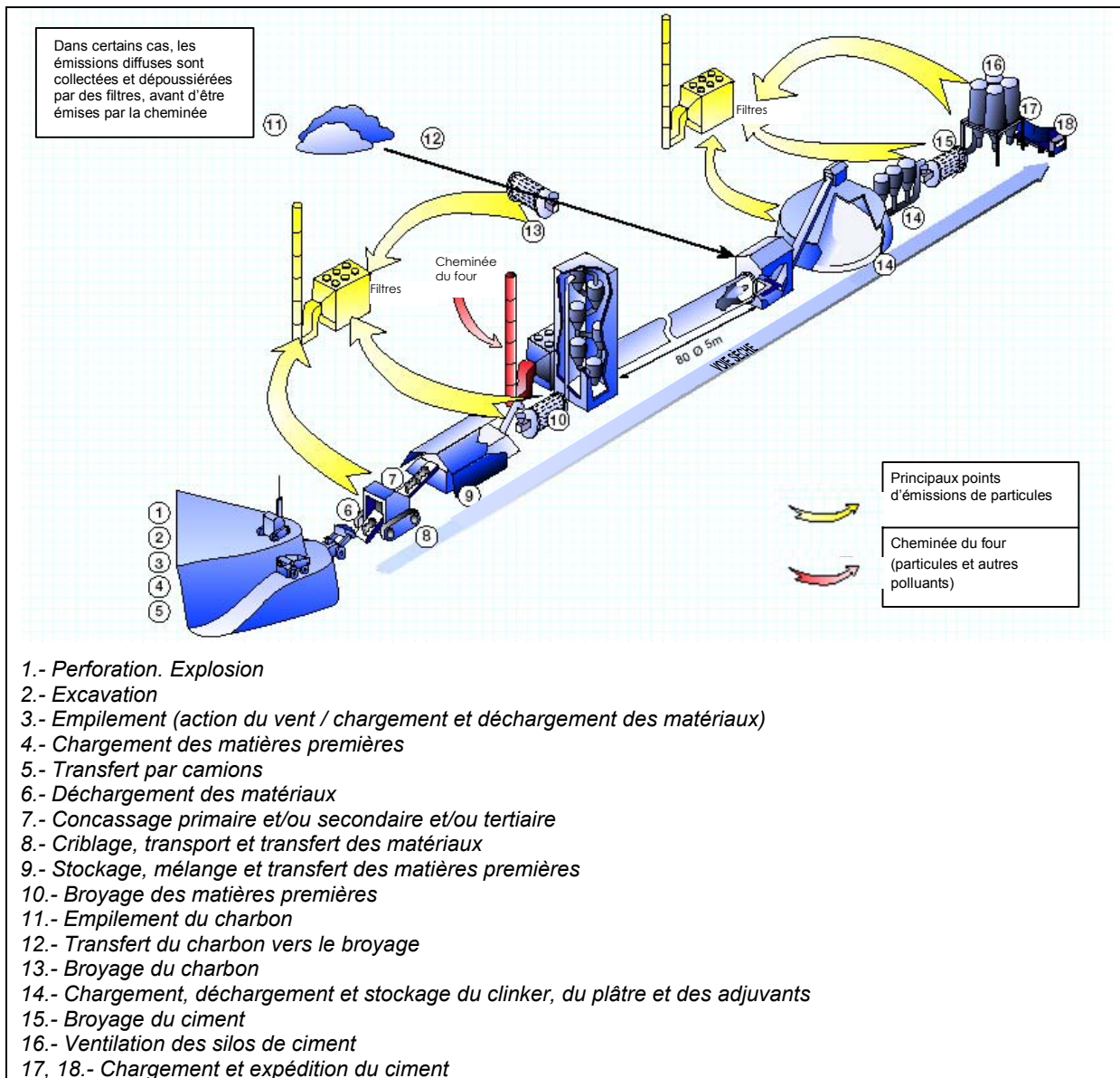


Figure 4.1.1. Polluants atmosphériques associés à l'industrie du ciment.

Voici un schéma du processus de fabrication du ciment, avec les principaux foyers d'émission de particules et d'autres polluants dans l'atmosphère (figure 4.1.2.).



Source : documents de référence sur les meilleures techniques disponibles applicables à l'industrie du ciment.

Figure 4.1.2. Schéma du processus de fabrication du ciment : foyers d'émission de particules et d'autres polluants dans l'atmosphère.

La présente section décrit les principales émissions dans l'atmosphère en fonction des différentes étapes du processus de fabrication du ciment, ainsi que les systèmes de mesure et de contrôle les plus courants pour les polluants type du secteur.

4.1.1.1. Obtention de la matière première

Il est évident que, du fait de sa nature, l'extraction de matières premières des carrières est susceptible de générer des impacts environnementaux. Néanmoins, il convient de préciser que lesdits impacts sont en majorité localisés et n'ont pas d'effet à grande échelle, au-delà des environs de l'exploitation.

En général, les perturbations provoquées par l'exploitation des carrières sont plutôt limitées et spécifiques, comme les émissions de poussière, le bruit des explosions, le démarrage des moteurs et la circulation des véhicules lourds. Cependant, grâce à l'application de bonnes pratiques et à la technologie moderne (voir le chapitre 5. *Opportunités de prévention et de réduction de la pollution*), il

est possible de réduire considérablement ces impacts, jusqu'à les rendre pratiquement non significatifs.

4.1.1.2. Préparation et stockage de la matière première

Pendant cette phase, le volume des émissions dans l'atmosphère est faible et peu concentré, et il s'agit uniquement de l'émission des particules provenant des opérations de broyage des matières premières. Dans les pays secs, l'émission des particules est particulièrement importante lors des opérations de stockage et de manipulation des matières premières, comme :

- Le transport vers la cimenterie ;
- Les opérations de chargement et de déchargement ;
- L'action du vent sur les stocks ;
- Les points de transfert ;
- Le transport interne.

Dans certains cas, lorsque les systèmes de contrôle adéquats ne sont pas disponibles, ces émissions peuvent être significatives au niveau local.

4.1.1.3. Préparation et stockage du combustible

Comme dans le cas des matières premières, les opérations de transport, de manipulation (chargement, déchargement et conditionnement) et de stockage des combustibles solides représentent également des sources potentielles d'émission de particules. Cependant, de la même façon, grâce à la technologie et à des pratiques environnementales appropriées, l'émission de particules ne constitue pas un problème significatif à cette étape.

4.1.1.4. Cuisson du clinker

Le foyer le plus important d'émission dans l'atmosphère par les cheminées est le four à clinker. Ces émissions proviennent des réactions physiques et chimiques des matières premières traitées et des combustibles employés pendant la cuisson. Les émissions importantes, associées à cette étape, sont les suivantes :

- Oxydes d'azote (NO_x) ;
- Dioxyde de soufre (SO_2) ;
- Particules (poussière).

La législation environnementale et l'exploitation des cimenteries se concentrent sur ces trois polluants, bien que les émissions de dioxyde de carbone, le CO_2 , soient également considérées comme d'une importance particulière dans la production du ciment.

Les principaux composants des gaz de combustion d'un four à ciment sont les suivants : l'azote de l'air de combustion, le CO_2 provenant de la décarbonatation du CaCO_3 et de l'oxydation du combustible, la vapeur d'eau issue de la combustion et des matières premières, et l'oxygène en excès (voir le tableau 4.1.1).

Tableau 4.1.1. Composition des gaz émis par le four.

Composant	% en volume
Azote (N ₂)	45 à 75
Dioxyde de carbone (CO ₂)	11 à 29
Eau (H ₂ O)	10 à 39
Oxygène (O ₂)	4 à 12
Reste (polluants inclus)	< 1

En plus des trois émissions importantes mentionnées précédemment, les autres émissions associées à l'exploitation du four sont les suivantes :

- Monoxyde de carbone (CO) ;
- Composés organiques volatils (COV).

Le contenu de ces deux composés dans les gaz émis est affecté par, en plus des conditions de la combustion, le contenu en matière organique des matières primaires, qui sont partiellement oxydées au contact des gaz du four.

Lorsque les fours à clinker utilisent des déchets organiques comme combustibles alternatifs (pneus, solvants, huiles, etc.), il est nécessaire d'effectuer un contrôle exhaustif des émissions qui inclut les polluants suivants, en plus de ceux mentionnés dans les paragraphes précédents :

- Métaux et leurs composés ;
- HF ;
- HCl ;
- Dioxines et furannes (PCDD et PCDF).

L'émission de ces quatre polluants est normalement très faible (voir le tableau 4.1.2), mais leur contrôle permet de garantir une exploitation correcte du four, dans le cadre des activités de traitement des déchets.

Dans tous les fours, le matériau se déplace à contre-courant des gaz de combustion chauds ; ce flux à contre-courant affecte l'émission des polluants, en la diminuant, à condition qu'il agisse comme un lit de fluide circulant. De cette façon, de nombreux composés provenant de la combustion, ou de la transformation des matières premières en clinker, restent dans le flux gazeux jusqu'à leur absorption, condensation ou rétention par le flux à contre-courant des matières premières.

La capacité d'absorption du matériau varie selon son état physique et chimique. Celui-ci dépend à son tour de la zone du four dans laquelle se trouve le matériau. Par exemple, le matériau qui sort de l'étape de calcination (décarbonatation) possède un contenu élevé en oxyde de calcium et, par conséquent, une capacité d'absorption élevée (neutralisation) des acides, comme HCl, HF et SO₂.

À titre d'exemple, des données type sur les émissions des fours sont regroupées dans le tableau 4.1.2. L'amplitude des plages d'émission des fours s'explique par les facteurs suivants :

- L'effet des matières premières d'origine locale et, dans une moindre mesure, des combustibles ;
- L'âge et la conception de l'usine, ainsi que les techniques employées.

Tableau 4.1.2. Plage des émissions type des fours à ciment.

	mg/Nm ³	Kg/tonne de clinker	t/année
NO _x (comme NO ₂)	< 200 à 3 000	< 0,4 à 6	400 à 6 000
SO ₂	< 10 à 3 500	< 0,02 à 7	< 20 à 7 000
Particules (poussière)	5 à 200	0,01 à 0,4	10 à 400
CO	500 à 2 000	1 à 4	1 000 à 4 000
CO ₂	400 à 520 g/Nm ³	800 à 1 040	0,8 à 1,04 millions
COT	5 à 500	0,01 à 1	10 à 1 000
HF	< 0,4 à 5	< 0,8 à 10 g/t	< 0,8 à 10
HCL	< 1 à 25	< 2 à 50 g/t	< 2 à 50
PCDD/F	< 0,1 mg/Nm ³	< 200 à 1 000 g/t	< 0,2 à 1 g/an
Métaux			
(Hg, Cd, Ti)	0,01 à 0,3 (surtout Hg)	20 à 600 mg/t	20 à 600 kg/an
(As, Co, Ni, Se, Te)	0,001 à 0,1	2 à 200 mg/t	2 à 200 kg/an
(Sb, PB, Cr, Cu, Mn, V, Sn, Zn)	0,005 à 0,3	10 à 600 mg/t	10 à 600 kg/an

Source : Cembureau.

Les volumes habituels de gaz émis par le four à clinker gris varient normalement entre 1 700 et 2 500 m³ par tonne de clinker (gaz sec, 101,3 kPa, 273 K). Les systèmes de four avec préchauffeur et précalcinateur présentent des volumes de gaz d'environ 2 000 m³/tonne de clinker (gaz sec, 101,3 kPa, 273 K).

Émissions d'oxydes d'azote

Le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂) sont les oxydes d'azote prédominants dans les gaz émis par le four à ciment (NO > 90 % des oxydes d'azote).

Les émissions de NO_x dépendent fondamentalement du type de four utilisé et des caractéristiques de la cuisson des matières premières.

La plage des émissions d'oxydes d'azote est comprise environ entre 200 et 3 000 mg de NO_x/m³ (comme NO₂, gaz sec, 273 K, 101,3 kPa, 10 % O₂).

Il existe deux sources principales de production de NO_x :

- NO_x thermiques : une partie de l'azote, contenu dans l'air de combustion, réagit avec l'oxygène pour former des oxydes d'azote ;
- NO_x de combustible : les composés d'azote, présents dans le combustible, réagissent avec l'oxygène pour former des oxydes d'azote.

NO_x thermiques

La formation des NO_x thermiques est largement favorisée lorsque la température de combustion est supérieure à 1 200 °C, faisant réagir les molécules d'azote et d'oxygène dans l'air de combustion.

Les NO_x thermiques se forment principalement dans la zone de clinkérisation du four, là où les températures approchent les 2 000 °C. La quantité de NO_x thermiques générés dans cette zone est liée autant à la température qu'au contenu en oxygène (facteur d'air en excès). Plus il existe d'oxygène en excès, plus la formation de NO_x thermiques est importante.

Lorsque les matières premières sont d'une cuisson difficile, la température de la zone de clinkérisation doit être plus importante, ce qui entraîne nécessairement une production plus importante de NO_x thermiques. Le degré de cuisson du cru dépend de la cristallographie/minéralogie des composés qui le constituent, et de la présence de minéraux fondants (fer, aluminium). C'est le cas de la fabrication du clinker blanc, dans lequel les matières premières sont très pauvres en minéraux fondants (pour ne pas obscurcir le clinker) et nécessitent des températures de clinkérisation plus importantes (d'environ 150 °C).

NO_x de combustible

Les NO_x de combustible sont issus de l'oxydation de l'azote (N) présent dans le combustible, lequel se combine avec d'autres atomes d'azote pour former du gaz N₂, ou réagit avec l'O₂ pour former des NO_x de combustible.

Dans un précalcinateur, la température s'établit dans la plage allant de 900 à 1 150 °C, sous la limite de formation des NO_x thermiques et, par conséquent, la plupart des NO_x formés dans cette zone du four seront des NO_x de combustible. C'est la même chose lorsqu'une partie du combustible est envoyée dans la zone d'entrée du four, où se crée une zone de combustion secondaire, avec une température similaire à celle correspondant à un précalcinateur.

Dans les fours dotés de précalcinateurs, où jusqu'à 60 % du combustible peut brûler dans le précalcinateur, la formation des NO_x thermiques est plus faible que dans les fours où tout le combustible brûle dans la zone de frittage.

En plus de la température et du contenu en oxygène (facteur d'air en excès), la formation des NO_x peut être influencée par la forme de la flamme et sa température, la géométrie de la chambre de combustion, la réactivité et le contenu en azote du combustible, la présence d'humidité, le temps de réaction et la conception du brûleur.

Émissions de dioxyde de soufre

Les émissions de SO₂ des cimenteries sont directement liées aux composés volatils soufrés, contenus dans les matières premières. Les fours qui emploient des matières premières pauvres en composés volatils soufrés produisent moins d'émission de SO₂, parfois même inférieure aux limites de détection.

Le dioxyde de soufre (SO₂) est le principal composé soufré émis (99 %), bien que de petites quantités de SO₃ soient générées et que, dans des conditions réductrices, du sulfure d'hydrogène (H₂S) puisse également se former. La plage des émissions de SO₂ s'établit entre 10 et 3 500 mg/Nm³.

Dans la matière première, les composés soufrés sont essentiellement présents sous forme de sulfates (comme par exemple le sulfate de calcium, CaSO₄) ou de sulfures (comme par exemple la pyrite, FeS₂).

Sulfates

Les sulfates des matières premières sont thermiquement instables à des températures supérieures à 1 200 °C et lorsqu'ils entrent dans la zone de frittage du four, ils se décomposent en formant du SO₂. Une partie du SO₂ se combine avec les alcalis et s'intègre ainsi à la structure du clinker. Le reste du SO₂ se déplace dans les zones moins chaudes du four, où il réagit soit avec l'oxyde de calcium calciné, soit avec le carbonate de calcium, puis il repasse de nouveau dans la zone de frittage (absorption chimique).

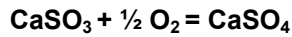
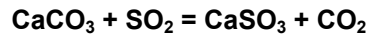
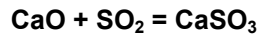
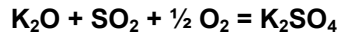
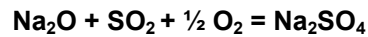


Figure 4.1.3. Réactions chimiques avec le SO₂.

Les composés soufrés inorganiques ou organiques des combustibles sont soumis au même cycle, composé d'une décomposition thermique, d'une oxydation en SO₂ et d'une réaction avec les alcalis ou l'oxyde de calcium. Grâce à ce cycle fermé, tout le soufre introduit par les combustibles, ou par les sulfates de la matière première, quitte le four intégré au clinker et sans être diffusé dans l'atmosphère sous la forme d'émissions de SO₂ ; car le soufre présent dans les combustibles des fours avec préchauffeur ne génère aucune émission significative de SO₂. L'oxygène en excédent (de 1 à 3 % de l'O₂ conservé dans le four pour obtenir un ciment de bonne qualité) oxydera les composés sulfureux libérés, en les transformant en SO₂.

Sulfures (ou composés soufrés organiques)

Les sulfures et le soufre organique présents dans les matières premières s'évaporent lorsque la température du cru commence à s'élever, contrairement aux sulfates, puis ils se décomposent et s'oxydent à des températures modérées de l'ordre de 400 à 600 °C en produisant du SO₂ ; 30 % ou plus est émis à la première étape de l'échangeur à cyclones. À ces températures, il n'existe plus suffisamment d'oxyde de calcium pour réagir avec le SO₂. Les gaz de cette étape sont diffusés dans l'atmosphère et sont transférés dans le broyeur de cru, lorsque celui-ci est en exploitation.

Dans le broyeur de cru, entre 20 et 70 % du SO₂ sera capturé par les matières premières finement broyées (absorption physico-chimique). Pour cette raison, il est important que, lorsque les matières premières contiennent des composés volatils soufrés, le broyage du cru soit optimisé pour qu'il agisse comme un système de capture de SO₂.

Dans un four avec préchauffeur à grille, l'absorption du SO₂ est également bonne, puisque le gaz passe à travers le lit de matière première partiellement calcinée et à travers les mélanges de carbonates de calcium dans la chambre de séchage.

Dans les fours longs à voie sèche ou humide, l'absorption chimique du SO₂ est généralement moins efficace, à cause du contact réduit entre les gaz de combustion et la matière première. Dans ces systèmes de four, pratiquement tout le soufre entrant contribue aux émissions de SO₂, et les niveaux d'émission de SO₂ sont supérieurs à ceux dans un four à voie sèche avec préchauffage.

Dans les cas de fabrication de ciments spéciaux, comme le ciment blanc, les critères suivants sont pris en compte :

- Plus grande difficulté de cuisson à cause de la cristallographie et de la minéralogie du cru ;
- Absence de fondants dans les matières premières pour préserver la couleur ;
- Absence d'alcali à cause de la pureté des matières premières ;
- Conditions d'exploitation du four (dans des conditions réductrices).

L'ensemble de ces conditions peut produire des émissions plus élevées de SO₂, n'entraînant pas le même pourcentage de fixation des oxydes de soufre au même niveau que dans la fabrication du clinker gris.

Émissions de particules (poussière)

Historiquement, l'émission de particules (poussière), en particulier par les cheminées des fours, a été la principale préoccupation environnementale en rapport à la fabrication du ciment.

Les principales sources de particules émises par les cheminées (sources localisées ou ponctuelles) sont les fours, les broyeurs de cru, les refroidisseurs de clinker et les broyeurs de ciment. Dans tous ces processus, de grands volumes de gaz circulent à travers des matériaux pulvérulents et, par conséquent, ces gaz se chargent en particules et doivent donc être dépoussiérés. L'utilisation de matériaux et de combustibles secondaires n'a aucune influence sur l'émission des particules du four, qui dépend uniquement de l'efficacité du dépoussiérage.

La conception et la fiabilité des précipitateurs électrostatiques modernes et des filtres à manches garantissent que les particules émises peuvent être réduites à un niveau non significatif ; en outre, il a été possible d'atteindre dans certaines installations des niveaux d'émission inférieurs à 10 mg/m³. Normalement, la plage des émissions de particules s'établit entre 5 et 200 mg/Nm³.

Émissions de CO₂

(Voir également la section 4.1.2. *Gaz à effet de serre*)

Traditionnellement, les émissions de CO₂ n'étaient pas considérées comme polluantes. Avec la signature et la ratification, par la majorité des pays du PAM, du protocole de Kyoto, les émissions de CO₂ doivent être comptabilisées par ces pays dans celles des gaz à effet de serre (GES) et, par conséquent, elles sont soumises aux législations nationales et aux mécanismes définis par le protocole de Kyoto (commerce des droits d'émission, projets d'application conjointe et mécanismes de développement propre).

Environ 5 % des émissions anthropiques, au niveau global du CO₂, sont émises par les activités de l'industrie du ciment. Pour cette raison, ladite industrie est soumise à l'utilisation des droits d'émission de GES, dans de nombreux pays du PAM.

Les sources d'émission de CO₂ peuvent être les suivantes :

- Calcination des carbonates et combustion du carbone organique contenu dans la matière première ;
- Combustion des combustibles fossiles (dans le four et en dehors) ;
- Combustion de la biomasse dans le four (non comptabilisée comme GES).

Les émissions totales de CO₂ dépendent par conséquent des paramètres suivants :

- Type de processus (efficacité du processus et des sous-processus) ;
- Combustible utilisé ;
- Rapport clinker/ciment.

L'émission de dioxyde de carbone (CO₂) représente 900 à 1 000 kg/tonne de clinker gris, en référence à une consommation spécifique d'environ 3 500 à 5 000 MJ/tonne de clinker, mais en fonction du type même de combustible. Le rapport est inférieur si l'on se réfère aux tonnes de ciment, puisque lors du broyage du ciment, d'autres minéraux et du plâtre sont ajoutés. Dans le cas du clinker blanc, le rapport est supérieur à cause d'une plus grande consommation énergétique.

Dans la fabrication du ciment gris par voie sèche, environ 60 % du CO₂ généré provient du processus de dissociation du carbonate de calcium du calcaire en oxyde de calcium et en CO₂ (appelée décarbonatation ou calcination du calcaire), et les 40 % restants sont issus de la combustion du combustible. Les émissions provenant de la combustion sont directement proportionnelles à la consommation spécifique et au rapport entre le contenu en carbone (C) et le pouvoir calorifique du combustible.

Dans le cas de la biomasse, son émission n'est pas comptabilisée dans celle des GES (gaz à effet de serre).

Les émissions du CO₂ de la combustion dans l'industrie du ciment ont été réduites progressivement, autour de 30 %, lors de ces 25 dernières années, principalement grâce à l'installation de fours plus efficaces.

Émissions de CO

L'émission de CO est liée aux matières organiques contenues dans les matières premières et aux conditions du processus de fabrication, mais elle peut également provenir d'une combustion incomplète, lorsque le contrôle de l'alimentation en combustibles solides n'est pas optimisé. En fonction des caractéristiques de la carrière, entre 1,5 et 6 g de carbone organique par kilo de clinker sont apportés au processus, par l'intermédiaire des matières premières.

Les essais réalisés avec des matières premières de différentes origines ont démontré que : entre 85 et 95 % des composés organiques présents dans les matières premières s'oxydent complètement en CO₂ en présence de 3 % d'oxygène en excès ; alors que 5 à 15 % s'oxydent partiellement en CO. La concentration en CO peut dépasser les 2 000 mg/Nm³ dans certains cas, avec certaines matières premières (rapport Cembureau, 1997).

Pour garantir l'uniformité de la vitesse d'alimentation du combustible solide, il est nécessaire de disposer de trémies, de convoyeurs et de distributeurs de bonne conception. Dans le cas contraire, il pourrait se produire une combustion sous-stœchiométrique, qui peut entraîner des pics de courte durée supérieurs à 0,5 % de CO. Ces pics de CO provoquent la déconnexion automatique des filtres électrostatiques, pour éviter le risque d'explosion provoquée par une augmentation de l'émission des particules.

Émissions de composés organiques volatils

En général, l'émission de composés organiques volatils (COV) et de monoxyde de carbone pendant les processus de combustion est souvent associée à des combustions incomplètes. Dans des conditions normales d'exploitation des fours à ciment, l'émission de ces composés est faible, à cause du long séjour des gaz dans le four, de la température élevée et des conditions de l'oxygène en excès.

Néanmoins, les matières premières de base, comme le calcaire, la marne, l'argile ou l'ardoise, peuvent contenir plus de 0,8 % de matière organique (en fonction des conditions géologiques de leur gisement). Une grande partie de cette matière organique se volatilise pendant les premières étapes du processus de cuisson (préchauffage, précalcination), y compris à des températures modérées comprises entre 400 et 600 °C, au fur et à mesure que le cru se réchauffe, provoquant l'émission des COV.

Il a été démontré que 85 à 95 % de la matière organique contenue dans la matière première, en présence d'un excès d'oxygène de 3 %, se convertit en CO₂ dans les gaz de combustion du four, et entre 5 et 15 % s'oxyde en CO. Seule une petite portion (normalement inférieure à 1 % du carbone organique total – COT) est émise comme composés organiques volatils (hydrates de carbone).

Le contenu en COV des gaz du four à ciment est généralement compris entre 10 et 100 mg/Nm³. Dans certains cas, les émissions de COV atteignent jusqu'à 500 mg/Nm³ à cause des caractéristiques des matières premières [rapport Cembureau, 1997].

Les concentrations de COV peuvent augmenter pendant les opérations de démarrage ou dans le cas d'un dysfonctionnement du four. La fréquence avec laquelle se produisent les situations d'exploitation anormale du four est très variable, d'une à deux fois par semaine jusqu'à une fois tous les deux ou trois mois.

Émissions de polychlorodibenzodioxines (PCDD) et de dibenzofurannes (PCDF)

Dans les processus de combustion, la présence de chlore et de composés organiques peut entraîner la formation de dioxines et de furannes (PCDD et PCDF) si, en même temps, les conditions de séjour et de température sont idéales.

La formation des dioxines et des furannes s'opère par synthèse (connue sous le nom de synthèse de novo) dans la plage de température comprise entre 200 et 450 °C, par réaction des hydrocarbures (précurseurs) avec le chlore. Par conséquent, il est important que les gaz du système de four soient rapidement refroidis en dessous de 200 °C. Dans la pratique, c'est ce qui se passe dans les systèmes avec préchauffage puisque les matières premières entrantes sont réchauffées par les gaz du four. D'un autre côté, la présence de chlore dans les gaz de combustion du four est limitée par les conditions du processus et la qualité du ciment.

Dans le cas d'une exploitation correcte, la production de ciment constitue rarement une source significative d'émissions de dioxines et de furannes. Néanmoins, il semblerait qu'il existe encore des incertitudes importantes sur les émissions de PCDD/F [Office de l'environnement du Land de Rhénanie du Nord-Westphalie, 1997].

La nouvelle ratification de la Convention de Stockholm sur les composés organiques persistants (COP) vise à prévenir et à réduire les émissions non intentionnelles de polychlorodibenzodioxines (PCDD), polychlorodibenzofurannes (PCDF), polychlorobiphényles (PCB) et hexachlorobenzène (HCB). Les fours à ciment brûlant des déchets dangereux sont explicitement mentionnés dans la Convention de Stockholm (Annexe C, partie II) comme une « source industrielle qui possède un potentiel comparativement élevé de formation et d'émission de ces composés chimiques dans l'environnement ».

Les données obtenues en provenance de plusieurs fours montrent des émissions de PCDD/PCDF aussi importantes que 1,76 ng EQT/m³, lorsque leurs dispositifs de contrôle de la pollution atmosphérique fonctionnent dans la plage comprise entre 200 et 230 °C. Les autres essais réalisés ont mis en évidence des émissions plus importantes pour certains fours dans lesquels étaient brûlés des déchets dangereux.

Différentes études réalisées ont pu établir la corrélation positive entre la concentration des émissions de PCDD et la température du précipitateur électrostatique/cheminée. La corrélation suivante était généralement observée : la température du précipitateur électrostatique enregistrée variait entre 255 °C et 400 °C ; les émissions de PCDD étaient plus importantes à 400 °C, mais diminuaient de cinquante fois à une température de 255 °C. Avec des températures inférieures à 250 °C à l'entrée du précipitateur électrostatique/cheminée, aucune corrélation n'a été détectée entre la température et les émissions de PCDD [Karstensen, 2004].

Des recherches plus poussées suggèrent que, tant que la combustion est satisfaisante, le facteur principal de contrôle est la température du dispositif de capture des poussières du système d'épuration des gaz. Les usines équipées de précipitateurs électrostatiques à basse température semblent bien contrôler leur émissions, avec ou sans utilisation de déchets comme combustibles [PNUE, 2003].

Après les différentes recherches réalisées, il est possible d'affirmer que les fours à ciment peuvent respecter des niveaux d'émission de 0,1 ng EQT/Nm³, qui est la valeur limite de la législation européenne pour les usines d'incinération et de co-incinération de déchets (directive du Conseil européen 94/67/CE et directive du Conseil européen et du Parlement européen 2000/76/CE).

Actuellement, l'industrie du ciment développe d'autres recherches dans ce domaine.

Émissions de métaux et de leurs composés

Les deux flux d'entrée dans le four à ciment, matières premières et combustibles, contiennent des métaux en concentrations variables selon leur origine. En particulier, l'utilisation de déchets comme

combustibles peut faire varier l'entrée des métaux dans le processus et, par conséquent, il est important de connaître les niveaux de métaux lourds dans les flux de matières premières et de combustibles.

Le principal foyer d'émission de métaux est le système de four, y compris les gaz de combustion et l'air des refroidisseurs de clinker. La concentration des émissions de métaux varie énormément en fonction des matières premières, des combustibles et des cycles du système de four. Les particules émises dans ces flux contiennent de petites quantités de composés métalliques comme le zinc (Zn), le cadmium (Cd), le mercure (Hg), le plomb (Pb), le thallium (Tl) et l'arsenic (As).

Les composés métalliques peuvent être classés en trois catégories, en fonction de la volatilité des métaux et de leurs sels :

- Métaux qui sont ou qui contiennent des composés non volatils : Ba, Be, Cr, As, Ni, V, Al, Ti, Mn, Cu et Ag ;
- Métaux qui sont ou qui contiennent des composés semi-volatils : Sb, Cd, Pb, Se, Zn, K et Na ;
- Métaux qui sont ou qui contiennent des composés volatils : Hg et Tl.

Le comportement de ces métaux dans le système de four dépend de leur volatilité :

- Les composés des métaux non volatils restent dans le processus et quittent le four intégrés à la composition du clinker ;
- Les composés des métaux semi-volatils sont partiellement vaporisés dans la zone de frittage et se condensent sur les matières premières dans les zones moins chaudes du système de four (préchauffeur). Cela produit un effet cyclique dans le système de four (cycles internes), jusqu'à ce qu'un équilibre s'établisse entre les métaux entrants dans le four et ceux qui sortent avec le clinker de ciment ;
- Les composés des métaux volatils se condensent sur les matières premières à basses températures et peuvent former des cycles internes ou externes. Le thallium et le mercure et leurs composés se volatilisent facilement et dans une moindre mesure le cadmium, le plomb, le sélénium et leurs composés. Des cycles internes se forment avec les composés métalliques qui réagissent avec le cru ou qui se condensent dans les zones moins chaudes du système (précalcinateur, préchauffeur ou lors du broyage du cru), puis qui reviennent sous forme solide jusqu'à la zone de frittage, où ils se volatilisent de nouveau. Des cycles externes se forment lorsque la poussière et les composés métalliques condensés se séparent dans les équipements de dépoussiérage et sont recyclés dans le processus avec le cru.

Les recherches sur l'équilibre des cycles démontrent que les métaux à volatilité faible et moyenne possèdent un degré élevé de rétention dans le clinker, tandis que ceux à volatilité élevée (Hg, Tl) présentent moins de rétention.

4.1.1.5. Broyage, ensachage et expédition du ciment

Comme dans le cas des matières premières et des combustibles, les opérations de broyage, de transport, de stockage et de manutention (chargement, déchargement et conditionnement) du ciment constituent des sources potentielles d'émission de particules, mais représentent un problème peu significatif grâce à l'application de bonnes pratiques environnementales et à l'utilisation d'une technologie appropriée.

4.1.2. Gaz à effet de serre

La lutte contre le changement climatique est devenue la question environnementale la plus importante de ces dernières années. La communauté scientifique internationale considère qu'il existe un rapport entre les émissions de dioxyde de carbone issues des activités énergétiques (production d'électricité, transport, chauffage, processus thermiques) et les changements climatiques observés ces dernières décennies.

En 1992, l'organisation des Nations unies (ONU) a défini la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, signée par plus de 140 pays. La Convention définit des lignes générales d'action au plan international, en mettant spécialement l'accent sur l'étude des conséquences du changement climatique et sur les moyens de lutte.

En 1997, le protocole de Kyoto a été conçu dans le cadre de la Convention et il est devenu le premier outil de portée internationale dans la lutte contre le changement climatique, en établissant des objectifs quantitatifs concrets de réduction des émissions.

Le protocole de Kyoto définit le commerce des émissions comme l'un des outils. L'Union européenne a mis en service en 2005 un marché de portée européenne pour la commercialisation des droits d'émission du dioxyde de carbone. Le marché concerne exclusivement les activités industrielles gourmandes en énergie, parmi lesquelles figure la fabrication de clinker.

Le marché des émissions représente un ensemble de défis à relever pour les entreprises industrielles. Certains d'entre eux, comme le suivi des émissions, seront résolus avec un effort important. D'autres questions, comme l'impact du marché sur la compétitivité des entreprises et la contribution du marché au respect du protocole de Kyoto, restent en suspens.

Actuellement, il est difficile de connaître l'impact économique consécutif à l'établissement du marché des émissions dans l'industrie. Par contre, ce qui est connu, c'est que les installations concernées par le marché doivent intégrer immédiatement les procédures et les méthodologies permettant de suivre les émissions de dioxyde de carbone sur leurs sites de production.

Les méthodologies de suivi doivent s'adapter, dans la mesure du possible, aux équipements existants dans les usines, en entraînant des modifications mineures (maintenance et calibrage des balances, etc.). Dans certains cas, les exigences de précision peuvent obliger le fabricant à effectuer des modifications importantes sur ses équipements et ses procédures. Dans tous les cas, un suivi précis, économique et souple des émissions de CO₂ est devenu une obligation pour les cimenteries concernées par le protocole de Kyoto.

Les sections suivantes décrivent brièvement l'effet de serre et le changement climatique, les caractéristiques de base du marché, les nouvelles exigences pour les entreprises et les cimenteries, et la manière dont ces dernières suivent leurs émissions de CO₂.

4.1.2.1. L'effet de serre et le changement climatique

La communauté scientifique considère comme plausible le fait que le changement climatique observé sur Terre ces dernières décennies soit provoqué par l'augmentation dans l'atmosphère des gaz à « effet de serre ». Les plus importants sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et le méthane.

Les gaz à effet de serre possèdent la propriété de capter le rayonnement infrarouge émis par la surface du globe terrestre, réchauffé par incidence du rayonnement solaire. Ce phénomène naturel est celui qui a permis que les conditions de température dans la troposphère (partie basse de l'atmosphère) conviennent au développement de la vie sur Terre, être humain compris.

L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre provoquée par les activités humaines (combustibles fossiles, agriculture et élevage) déséquilibre le bilan du rayonnement thermique entre le soleil et la Terre ; c'est-à-dire qu'elle modifie le bilan entre le rayonnement solaire qui arrive sur la Terre et le rayonnement émis par la Terre vers l'espace. En résumé, il est possible d'affirmer que l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre entraîne le globe terrestre à émettre moins d'énergie vers l'espace et que, par conséquent, la quantité d'énergie présente dans l'atmosphère augmente. Cela provoque une augmentation des températures de l'atmosphère et des océans, ce qui affecte le régime des pluies, le développement des forêts et l'environnement dans son ensemble.

C'est pour cette raison que la communauté internationale, en application du principe de précaution, a décidé de développer des activités d'étude et de lutte contre le changement climatique.

4.1.2.2. Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques

L'organisation des Nations unies (ONU) a encouragé la négociation et la signature de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques en 1992, résultat des différentes résolutions adoptées par l'Assemblée générale des Nations unies qui, à la fin des années quatre-vingts, a invoqué la nécessité d'agir ensemble pour étudier et réduire le changement climatique et ses conséquences, en application du principe de précaution, et en tenant compte des incertitudes notables que nous avons résumées dans la section précédente.

Pratiquement 150 pays du monde entier, et de différents niveaux économiques et sociaux, ont ratifié la Convention, dont l'objectif fondamental est la « stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche les interférences anthropiques dangereuses avec le système climatique ».

Les lignes de base de la Convention sont les suivantes :

- L'étude du changement climatique et de ses effets sur la nature. De ce point de vue, une grande importance est donnée à l'élaboration des inventaires nationaux d'émission, au suivi et à l'observation des données climatologiques, ainsi qu'à la coopération internationale dans ce domaine ;
- Les pays en développement assument leur responsabilité quant aux émissions historiques de gaz à effet de serre et, par conséquent, reconnaissent la nécessité d'être les chefs de file de la lutte contre le changement climatique ;
- La dotation de ressources techniques, humaines et financières est fondamentale. De ce point de vue, les pays pauvres doivent obtenir les ressources qui leur permettront de contribuer à la lutte contre le changement climatique, sans renoncer de quelque façon que se soit à leurs aspirations légitimes au développement économique et au bien-être, avec une mention explicite dans le texte sur « l'éradication de la pauvreté ». La dotation des ressources financières à travers des organismes internationaux (Banque mondiale du développement, etc.) et le transfert de technologie sont deux thèmes plusieurs fois répétés dans la Convention.

La lutte contre le changement climatique doit être compatible avec la croissance économique, ladite croissance économique devant être durable en termes d'utilisation efficace et rationnelle des ressources énergétiques et naturelles.

La Convention définit, comme instrument d'action en matière de lutte contre le changement climatique, l'approbation des protocoles développés par la Convention.

4.1.2.3. Le protocole de Kyoto

Le protocole de Kyoto de 1997 a pris le nom de la ville japonaise où fut célébrée la conférence des parties de la Convention à la fin de ladite année.

Le protocole de Kyoto définit un partage international de la réduction des émissions de gaz à effet de serre pour trente-huit pays, afin d'atteindre un objectif de réduction d'au moins 5 % des émissions conjointes de ces pays, par rapport aux émissions de 1990, pendant une période d'engagement comprise entre 2008 et 2012 (en considérant que la réduction doit être réalisée tout au long des années 2008 à 2012, en tant que moyenne quinquennale des émissions).

Le tableau 4.1.3 montre que la majorité des pays du plan d'action pour la Méditerranée ont déjà ratifié le protocole de Kyoto :

Tableau 4.1.3. Protocole de Kyoto dans les pays du PAM.

Situation du protocole dans les pays du PAM		
	Ratifié	Non ratifié (au mois de novembre 2005)
SUD	Algérie	Liban
	Égypte	Libye
	Maroc	Syrie
	Tunisie	
NORD	Espagne	Monaco
	France	
	Grèce	
	Italie	
EST	Albanie	Bosnie-et-Herzégovine
	Chypre	Croatie
	Slovénie	Serbie et Monténégro
	Israël	
	Malte	
	Turquie	

Les gaz à effet de serre concernés par le protocole de Kyoto sont au nombre de six :

- Dioxyde de carbone (CO₂) ;
- Méthane (CH₄) ;
- Protoxyde d'azote (N₂O) ;
- Hydrofluorocarbones (HFC) ;
- Perfluorocarbones (PFC) ;
- Hexafluorure de soufre (SF₆).

Parmi ceux-ci, la première place est occupée par le dioxyde de carbone (CO₂), généré principalement lors des processus de combustion (centrales thermiques, chaudières, véhicules, chauffage, etc.), suivi du méthane (CH₄), provenant de la décomposition des matières organiques (fermentation dans les sites d'enfouissement de déchets urbains, exploitations d'élevage, etc.).

Les puits à gaz (par exemple la reforestation), le marché international des émissions et les mécanismes flexibles sont des options mentionnées par le protocole, pour que ses signataires puissent respecter leurs engagements sans le faire exclusivement sur la base des efforts réalisés dans le pays lui-même. Cette souplesse est, en plus d'être nécessaire, absolument cohérente avec la nature du problème environnemental auquel nous faisons face. Il s'agit d'un sujet de portée mondiale et, bien que les effets du changement climatique varient sur la planète d'une région à l'autre, peu importe dans quelle partie du globe terrestre les émissions se produisent, puisque l'atmosphère toute entière en sera affectée.

Parmi les mesures mentionnées dans le protocole, le « mécanisme pour un développement propre » (clean development mechanism) semble le plus prometteur. Il s'agit, en résumé, pour un pays

signataire du protocole d'investir dans un autre pays en voie de développement, afin que la réduction des émissions de gaz à effet de serre provenant de l'investissement soit comptabilisée comme ayant été effectuée dans le pays d'origine de l'investissement. Les investissements peuvent provenir d'entreprises ou d'organismes gouvernementaux et peuvent être réalisés directement ou à travers des « fonds carbone » définis par des entités comme la Banque mondiale. Ce mécanisme représente une incitation à l'investissement dans les pays en voie de développement, ce qui représente l'un des bénéfices les plus positifs en termes de coopération internationale issue du protocole de Kyoto et, par conséquent, il mérite d'être encouragé par les administrations publiques et les entreprises.

Les politiques forestières requièrent une attention spéciale, parce qu'en plus de fournir des puits pour la déduction d'émissions, elles permettent de récupérer des espaces naturels et de renforcer les économies rurales. Cette mesure rencontre aujourd'hui des difficultés et des limitations, qu'il faudra dépasser dans le futur pour qu'elle puisse contribuer significativement à la lutte contre le changement climatique.

Le protocole de Kyoto est un pari ferme pour :

- L'amélioration du rendement énergétique des processus de production ;
- Le rendement énergétique des modes de transport et de chauffage, qui représentent la part du lion des émissions globales ;
- L'implantation des mécanismes de coopération internationale, qui permettent de lutter contre le changement climatique, tout en aidant le développement économique et social des pays les moins favorisés ;
- Les puits et les réservoirs d'émission (reforestation, politiques agraires, etc.) ;
- La recherche et le développement des formes de production et de transformation de l'énergie (dossier des énergies renouvelables, espoirs fondés sur la fusion nucléaire, gaz naturel, hydrogène, etc.).

Les défis posés par le changement climatique doivent être convertis en incitations pour l'innovation, l'investissement et l'ingénierie, et par conséquent pour les économies.

Le protocole de Kyoto dans l'industrie du ciment

L'industrie du ciment est l'un des secteurs les plus concernés, puisqu'il représente l'une des principales sources d'émission de CO₂, aggravée par la construction d'autoroutes, de routes et d'autres infrastructures. Chaque tonne de ciment consommée provoque l'émission de 498 kg de CO₂.

Concrètement, l'industrie mondiale du ciment génère autour de 5 % des émissions de gaz à effet de serre, qui proviennent d'un côté de la consommation des combustibles (40 %) et, d'un autre côté, du processus de fabrication du ciment, à cause de la décarbonatation des matières premières (60 %) ; ce dernier CO₂ provient de la réaction chimique survenant dans le four.

Le tableau 4.1.4 présente la production de ciment et les tonnes de CO₂ produites par la décarbonatation du clinker dans les pays du PAM en 2002 :

Tableau 4.1.4. Production de ciment et tonnes de CO₂ émises par la décarbonatation de la matière première en 2002.

	Production de clinker en kt, année 2002	CO ₂ en kt par décarbonatation du clinker, année 2002
Albanie	190	25
Algérie	8 900	4 488
Bosnie	850	150
Croatie	3 300	1 684
Chypre	1 790	798
Égypte	28 500	11 469
Espagne	42 420	21 193
France	19 437	9 973
Grèce	14 680	7 729
Israël	4 582	3 491
Italie	41 400	19 947
Liban	3 200	1 422
Libye	3 320	1 496
Malte	0	0
Maroc	8 800	5 086
Monaco	0	0
Serbie et Monténégro	2 485	1 195
Slovénie	1 180	626
Syrie	5 010	2 443
Tunisie	5 550	3 003
Turquie	32 758	16 243

Source : CDIAC.

Dans ce contexte, l'industrie du ciment recherche de nouvelles voies pour améliorer son rendement énergétique, en rénovant ses installations pour optimiser son rendement énergétique et pour développer des processus et des produits qui nécessitent moins d'énergie ; en outre, elle étudie d'autres alternatives possibles pour réduire ses émissions de CO₂.

Pour ce faire, les fours et les systèmes de refroidissement ont été modifiés, des combustibles alternatifs ont été recherchés, en plus de l'emploi d'adjuvants minéraux qui, broyés avec le clinker, produisent des ciments aux prestations similaires ou améliorées, ce qui réduit la fabrication de clinker. Toutes ces améliorations réduisent les émissions liées à la fabrication du ciment, par quantité d'énergie consommée et de produit.

4.1.3. Bruits et vibrations

Le bruit, dans certaines circonstances, comme dans le cas de la proximité d'une usine ou d'une carrière avec des quartiers habités ou des espaces d'intérêt naturel, peut représenter un aspect environnemental significatif dans ce secteur industriel.

Le bruit généré par les activités industrielles dans la fabrication du ciment a pour origine principalement le fonctionnement de la machinerie et les explosions dans les carrières (dans le cas des cimenteries intégrées). Les équipements mécaniques (broyeurs, convoyeurs à chaîne, refroidisseurs à satellites, etc.) génèrent du bruit à cause de la friction et des chocs des matériaux

solides entre eux. Les ventilateurs, les compresseurs et les conduites de gaz génèrent du bruit par friction des gaz sur les parois des tubulures, sur les pales et par friction des gaz à différentes vitesses (ventilateurs et extracteurs, transports pneumatiques, etc.).

Techniquement, les solutions possibles et les mesures à prendre, pour la réduction des émissions sonores des équipements industriels, ainsi que pour leur efficacité, dépendent fondamentalement des facteurs suivants :

- Type de source émettrice de bruit ;
- Intensité du bruit ;
- Fréquence du son : graves/aigus ;
- Emplacement de l'équipement et disponibilité en espace.

Il existe trois moyens pour combattre les émissions sonores :

- Actions sur le foyer ;
- Actions sur le moyen de transmission ;
- Actions sur le récepteur.

Les mesures généralement adoptées par l'industrie sont les encoffrements, les barrières acoustiques, le capotage des convoyeurs, la pose de matériau absorbant et les silencieux. La mesure la plus fréquente pour combattre le bruit généré par les broyeurs et les compresseurs consiste à installer des encoffrements insonorisés avec du matériel isolant et/ou absorbant, qui réduisent la transmission vers l'extérieur des niveaux sonores élevés produits dans ce type d'installations. Pour les ventilateurs, la solution consiste à installer des silencieux.

4.1.4. Odeurs

L'émission de mauvaises odeurs dépendra en général d'un contenu élevé en soufre dans les matières premières et les combustibles, mais généralement elle n'est pas considérée comme un impact significatif.

4.2. SOURCES DE PRODUCTION DE DÉCHETS LIQUIDES ET LEUR CONTRÔLE

Les eaux provenant de cette activité sont de trois types : eaux résiduaires, composées des eaux usées, des eaux de nettoyage des installations et des services auxiliaires (laboratoire) ; eaux de refroidissement générées lors des purges du système de circuit fermé (qui peuvent inclure les eaux de renouvellement des échangeurs ioniques ou les eaux de rejet de l'osmose inverse) ; et les eaux pluviales, qui sont récupérées via un réseau de collecteurs indépendants.

Les eaux produites par le processus de fabrication du ciment, qui ne s'évaporent pas dans le four, sont recyclées dans le processus. L'eau de filtrage, provenant du filtre presse dans le procédé semi-humide, est récupérée et traitée par des méthodes physiques et chimiques avant rejet dans le milieu récepteur.

Généralement, les eaux résiduaires de cette activité ont une incidence peu significative sur l'environnement et, par conséquent, il est nécessaire de toujours tenir compte des caractéristiques particulières du milieu hydrique récepteur.

4.3. SOURCES DE PRODUCTION DE DÉCHETS SOLIDES ET LEUR CONTRÔLE

Les déchets produits pendant la fabrication de clinker sont constitués généralement de :

- Matériaux en dehors des spécifications, qui sont extraits des matières premières lors de la préparation du cru ;
- Particules provenant du by-pass ou du filtre, et qui ne peuvent pas être recyclées dans le processus.

En plus des déchets associés au processus même de fabrication du clinker et du ciment, de petites quantités de résidus sont générées en provenance de l'exploitation et de la maintenance des équipements mécaniques et électriques :

- Huiles usagées et graisses de lubrification ;
- Liquides diélectriques des transformateurs électriques ;
- Autres liquides.

4.4. CONSOMMATION D'ÉNERGIE

L'industrie du ciment est connue comme une industrie gourmande en énergie, comme l'industrie papetière, les aciéries et la pétrochimie. Le coût de l'énergie dans la production du ciment Portland représente entre 20 et 30 % du coût total. Si la dépense énergétique est réduite, elle produit immédiatement des avantages économiques et environnementaux et, par conséquent, l'optimisation de la consommation d'énergie est un objectif prioritaire de l'industrie du ciment. Une augmentation du rendement énergétique implique toujours une diminution de toutes les émissions associées au processus de combustion (NO_x, SO₂, CO₂, CO et métaux lourds). Néanmoins, la réduction de ces émissions ne doit pas être considérée comme proportionnelle à la réduction de la consommation énergétique, puisque qu'elles peuvent dépendre également des matières premières et des procédés associés.

En ce qui concerne les émissions de CO₂, plus de la moitié de ces émissions associées à la production de ciment proviennent de la décarbonatation des matières premières calcaïques et, par conséquent, elles sont indépendantes du processus de combustion. Si des combustibles, considérés à émission zéro (comme les biocombustibles), étaient utilisés pour le processus thermique, les émissions du seul CO₂ pourraient être réduites de 54 %.

4.4.1. Principaux consommateurs énergétiques du processus de fabrication du ciment

4.4.1.1. Extraction de la matière première

Les principales matières premières de l'industrie du ciment sont la pierre calcaire et l'argile. Généralement, la matière première principale (pierre calcaire) est extraite d'une exploitation minière adjacente ou proche de la cimenterie.

Le matériau extrait est ensuite sélectionné, concassé, broyé et mélangé pour obtenir la granulométrie et la composition chimique requise pour le processus thermique dans le four à clinker. Tout ce processus consomme environ 8,8 kWh/tonne de matière première, où 88 % de l'énergie est consommée lors du processus d'extraction et les 12 % restants lors du processus de concassage. Il convient de souligner qu'au moins 1,5 à 1,75 tonne de matière première est nécessaire pour chaque tonne de ciment.

4.4.1.2. Préparation de la matière première

Une fois que le minéral a été mélangé dans des proportions adéquates avec les adjuvants correcteurs et/ou d'autre type de déchets d'origine industrielle, il est ensuite broyé. Ce broyage peut être humide ou sec, en fonction du type de four existant dans l'usine.

Le broyage et la préparation de la matière première consomment entre 25 et 35 kWh/t, en fonction du type de broyage, le coût en énergie électrique étant inférieur dans le cas d'un broyage humide par rapport au broyage sec. Le rendement des processus de broyage est difficile à évaluer car l'estimation de la quantité de travail nécessaire pour atteindre une granulométrie donnée est une tâche compliquée. Ce rendement se situe entre 6 et 25 % ; en ce qui concerne la consommation d'énergie électrique, une augmentation du rendement du processus implique une diminution des pertes dans les lignes de transmission et à la production électrique.

L'un des aspects à prendre en compte dans la préparation des matières premières pour leur entrée dans le four est leur teneur en humidité. Comme cela été mentionné à la section 4. *Description des processus*, lorsque la matière première contient plus de 20 % d'eau, le procédé humide doit être préféré aux autres. Si le procédé humide diminue l'émission de poussière, il nécessite une énergie thermique supplémentaire pour éliminer a posteriori l'eau de la matière première. Généralement, la pâte qui alimente le four dans le procédé par voie humide possède une teneur en eau de 36 %, tandis qu'avec le procédé par voie semi-humide, cette teneur varie entre 17 et 22 %, se traduisant par une économie d'énergie thermique dans la production du clinker.

4.4.1.3. Fabrication du clinker

La fabrication du clinker est le processus le plus gourmand en énergie, concentrant plus de 90 % de la consommation totale de l'industrie du ciment. Pendant cette étape, l'énergie thermique est utilisée pour :

- le chauffage de la matière première ;
- l'évaporation de l'humidité libre ;
- la calcination des composants carbonatés ;
- le procédé de clinkérisation.

La consommation d'énergie thermique dépend énormément du type de procédé utilisé pour fabriquer le clinker, plus concrètement du pourcentage d'humidité : de manière générale, il est nécessaire de faire la distinction entre le procédé sec et le procédé humide.

Procédé humide

Dans un four rotatif humide, l'alimentation contient 36 % d'eau. Ces fours furent développés comme une alternative aux fours secs et longs, afin d'améliorer le contrôle du degré de finesse du cru d'alimentation. La consommation énergétique de ce type de four varie entre 5,3 GJ/tonne de clinker et 7,1 GJ/tonne de clinker (31 % à 25 % de rendement thermique). Cet intervalle est la conséquence de la variabilité qui existe dans la teneur en eau du cru d'alimentation et l'énergie nécessaire pour son évaporation.

Procédé sec

Dans un four sec, le contenu en eau du cru d'alimentation est de 0,5 % et, par conséquent, les besoins énergétiques pour évaporer l'eau sont réduits et la longueur du four rotatif également. La consommation-type d'un four avec 4 ou 5 étages de cyclones de préchauffage oscille entre 3,2 et 3,5 GJ/tonne de clinker (55 % à 50 % d'efficacité), tandis qu'un four avec 6 étapes de préchauffage consomme théoriquement 2,9 à 3,0 GJ/tonne de clinker. Les fours les plus efficaces, avec précalcinateur et préchauffeur, utilisent 2,9 GJ/tonne de clinker lors du processus, atteignant 60 % de rendement thermique.

4.4.1.4. Broyage du ciment

La consommation d'énergie dépend de la surface requise du produit (finesse) et des adjuvants utilisés. La consommation d'énergie électrique nécessaire à l'étape de broyage final dépend fortement de la dureté de la matière première (calcaire, clinker, pouzzolane, etc.) et de la finesse requise du

produit final, ainsi que de la quantité d'adjuvants utilisés. La cendre de haut-fourneau est un matériau dur qui nécessite plus d'énergie au broyage, entre 50 et 70 kWh/tonne de matériau pour 3 500 Blaine (cm^2/g).

Traditionnellement, le broyeur à boulets est le plus utilisé pour effectuer ce broyage, parmi les procédés décrits à la section 3.2.5. Les broyeurs à boulets modernes utilisent entre 32 et 37 kWh/t pour obtenir une finesse de 3 500 Blaine (cm^2/g).

4.4.1.5. Expédition

Pendant cette étape, de l'énergie supplémentaire est nécessaire pour les convoyeurs et le système d'emballage. Généralement, ces consommations sont faibles et ne dépassent pas 5 % de la consommation totale d'énergie demandée par la fabrication du ciment.

La dépense énergétique estimée pour les systèmes auxiliaires se situe à 10 kWh/tonne de clinker.

4.4.1.6. Tableau récapitulatif

Voici un tableau récapitulatif des caractéristiques et des plages de consommation énergétique du processus de fabrication du ciment, selon le procédé humide, semi-humide, semi-sec, sec et long, SP (préchauffeur à cyclones) et NSP (préchauffeur à cyclones avec précalcinateur).

Un cas plus concret et détaillé de la consommation énergétique en fonction de la technologie employée (humide, SP et NSP) est détaillé dans le tableau suivant :

Tableau 4.4.1. Caractéristiques et consommation d'énergie par type de procédé.

	Humide	Semi-humide	Semi-sec	Sec et long	SP	NSP
Consommation spécifique de chaleur [GJ/t]	5,0 - 7,5	3,4 - 4	3,2 - 3,9	3,6 - 4,5	3,1 - 3,5	3,1 - 3,2
Consommation électrique spécifique [MWh/t]	0,025	0,03	0,03	0,025	0,022	0,022
Capacité du four [t/j]	300 - 3 600	300 - 5 000	300 - 2 000	300 - 2 800	300 - 4 000	2 000 - 13 000
Alimentation	Pâte	Tourteau de filtrage	Matière première pelletisée	Matière première sèche	Matière première sèche	Matière première sèche
Pourcentage d'humidité [%]	28 - 43	16 - 21	10 - 12	0,5 - 1,0	0,5 - 1,0	0,5 - 1,0
Type de four	Long	Long/Lepol	Long/Lepol	Long	Court	Court
Dispositifs d'échange de chaleur	-	Cyclones/préchauffeur à grille	Cyclones/préchauffeur à grille	-	Préchauffeur à cyclones	Préchauffeur à cyclones

Source : *lpts*, 2003.

Tableau 4.4.2. Tableau récapitulatif des consommations en GJ/tonne de clinker.

CONSOMMATEUR	TYPE DE PROCÉDÉ					
	HUMIDE		SEC –(SP)		SEC – (NSP)	
	GJ/t cli.	%	GJ/t cli.	%	GJ/t cli.	%
Théorique (% = rendement thermique sur la fournée)	1,78	30,5	1,83	36,6	1,76	49,9
Perte en gaz de combustion	0,75	12,1	1,38	27,7	0,50	14,1
Évaporation du mélange	2,24	35,9	0,30	6,0	0,24	6,7
Poussière dans les gaz de combustion	0,01	0,2	0,01	0,3	0,00	0,0
Déchargement du clinker	0,06	0,9	0,06	1,2	0,07	1,9
Gaz de combustion refroidissement du clinker	0,19	3,0	0,59	11,8	0,61	17,4
Pertes paroi du four	0,68	10,9	0,61	12,2	0,18	5,0
Consommations diverses	0,09	1,4	0,19	3,8	0,17	4,9
TOTAL CONSOMMATION DU FOUR	5,84	93,7	4,99	92,7	3,53	90,0
Extraction de matière première	0,03	0,5	0,03	0,6	0,03	0,8
Préparation/Broyage de matière première	0,11	1,7	0,11	2,0	0,11	2,8
Broyage du ciment	0,22	3,5	0,22	4,0	0,22	5,5
Expédition	0,04	0,6	0,04	0,7	0,04	0,9
TOTAL CONSOMMATION DE LA CIMENTERIE	6,23	100,0 %	5,38	100,0 %	3,92	100,0 %

Source : The Rotary Cement Kiln, *Chemical Publishing Co., Inc.; CEMBUREAU et al.*

(SF : Suspension Furnace –Préchauffage / PC : Preclinker – Précalcinateur)

4.5. CONSOMMATION D'EAU

En fonction du processus de production, l'industrie du ciment peut se caractériser par une grande consommation d'eau. C'est le cas du procédé par voie humide ou semi-humide. Néanmoins, les caractéristiques ces procédés n'impliquent pratiquement pas de production de déchets liquides.

Dans les cimenteries, il faut environ 0,6 m³ d'eau par tonne de ciment pour le refroidissement de la machinerie. La plus grande partie de cette eau est recyclée, seules les pertes devant être remplacées.

Mis à part l'utilisation d'eau pour le refroidissement des machines, dans les procédés par voie humide ou semi-humide, il existe une consommation d'eau élevée lors de l'étape de broyage des matières premières, puisque de l'eau est ajoutée pour former une pâte qui sera introduite dans le four. Cet ajout est généralement de 400 à 600 litres d'eau par tonne de matière sèche dans les broyeurs à boulets et de 500 à 800 litres par tonne de matière sèche pour le broyage de la matière première dans des broyeurs barboteurs.

Plus le contenu en eau est important, plus la consommation énergétique requise dans le four est élevée ; il est donc nécessaire de réduire la consommation au minimum compatible avec le flux requis et les caractéristiques nécessaires à la pâte pour son pompage.

Comme le montre le tableau 4.5.1, le procédé par voie semi-humide présente une réduction de 60 % de la consommation en eau par rapport à la voie humide mais il nécessite quand même un apport moyen de 0,26 m³ d'eau par tonne de clinker.

Tableau 4.5.1. Consommation d'eau en fonction du type de four.

TYPE DE FOUR	CONSOMMATION D'EAU (m ³ /tonne de clinker)	OBSERVATIONS
Long à voie humide	0,65 – 0,85	Pour augmenter la fluidité de la pâte
À voie semi-humide et semi-sèche	0,17 – 0,35	
À voie sèche	Aucune	

Source : Cembureau.

4.6. UTILISATION DE DÉCHETS INDUSTRIELS COMME MATIÈRES PREMIÈRES OU COMBUSTIBLES

Depuis le milieu des années quatre-vingts, les matières premières et les combustibles alternatifs, provenant d'autres processus industriels, ont été utilisés dans l'industrie du ciment.

L'utilisation correcte dans les cimenteries de matières premières et de combustibles alternatifs, ainsi que d'adjuvants minéraux, présente de nombreux avantages environnementaux et socio-économiques (voir 4.6.1. *Avantages environnementaux* et 4.6.2. *Avantages socio-économiques*), parce que les fours à ciment jouent un rôle important, autant économique qu'écologique, dans les programmes de recyclage et de valorisation.

4.6.1. Avantages environnementaux

Préservation du milieu naturel

Les fours à ciment utilisent autant le contenu calorifique que le contenu minéral des matériaux alternatifs. Les combustibles fossiles comme le carbone ou le pétrole brut sont remplacés par d'autres matériaux qui, s'ils n'étaient pas utilisés dans le processus de production du ciment, seraient mis au rebut ou incinérés.

La partie minérale des combustibles alternatifs (cendres), ainsi que les déchets industriels non combustibles, ou sous-produits, peuvent remplacer en partie la matière première naturelle (calcaire, argile, etc.). Pratiquement tous les composants de ces matériaux restent intégrés au produit et, à quelques exceptions près, ne génèrent aucun déchet.

L'utilisation d'adjuvants minéraux provenant d'autres processus industriels, comme substituts du clinker, réduit autant la consommation des ressources naturelles que sont les matières premières que celle des ressources en énergie, du fait de la réduction de la forte consommation d'énergie nécessaire à la production du clinker.

Protection de l'atmosphère

En prenant en considération les caractéristiques spécifiques du processus de cuisson, les émissions en provenance du four à ciment sont indépendantes des caractéristiques des combustibles. L'utilisation de déchets industriels comme combustibles dans les cimenteries élimine donc les émissions correspondantes, en provenance des usines d'incinération et des sites d'enfouissement, et permet de ne pas créer de nouvelles émissions.

Protection des eaux de surface et du sous-sol

À cause de l'utilisation de déchets industriels comme combustibles dans la fabrication du ciment, ces déchets ne sont pas transférés dans les sites d'enfouissement et ne produisent par conséquent ni effluents liquides, ni gaz polluants dans les sites d'enfouissement, réduisant ainsi le risque de pollution.

Réductions des gaz à effet de serre

Le remplacement des combustibles fossiles par des combustibles alternatifs (renouvelables) réduit l'émission globale de CO₂ d'origine thermique (neutralité du CO₂). Un taux de substitution thermique de 40 %, dans une cimenterie avec une production annuelle d'un million de tonnes de clinker, réduit la production nette de CO₂ de quelque 100 000 tonnes.

Plus important encore, le remplacement du clinker par des adjuvants minéraux réduit la formation du CO₂ issu de la combustion des combustibles fossiles d'une quantité équivalente à celle de CO₂ produit lors de la décarbonatation de la matière première.

De plus, l'utilisation de matières premières et de combustibles alternatifs, ainsi que d'adjuvants minéraux, contribue significativement au programme mondial de réduction des gaz à effet de serre.

Production électrique

Grâce à l'utilisation appropriée des déchets, les fours à ciment contribuent la fourniture d'énergie électrique ou thermique, réduisant la consommation des ressources naturelles et réduisant l'émission globale de CO₂.

4.6.2. Avantages socio-économiques

Réduction des taxes sur les dépôts de déchets contrôlés

Les cimenteries bénéficient économiquement de l'utilisation des déchets industriels, puisque non seulement elles économisent le coût de la matière première remplacée, mais elles reçoivent également une rémunération pour leur gestion des déchets, offrant un prix compétitif d'un coût inférieur à celui requis par leur mise au rebut dans les sites d'enfouissement ou par leur traitement dans des incinérateurs spécialisés. En outre, l'investissement public nécessaire à l'installation des usines d'incinération s'en trouve également réduit.

Réduction des besoins en terrain

Grâce à l'intégration des fours à ciment dans les programmes nationaux de gestion des déchets, les besoins en terrain supplémentaire pour les sites d'enfouissement diminuent.

Investissements dans des technologies propres

Les matériaux de substitution provenant des flux de déchets réduisent généralement le coût de production du ciment, renforçant la position de l'industrie du ciment, notamment par rapport aux importations des pays dotés de législations environnementales moins restrictives. Cela facilite également le développement de technologies d'émission dans l'atmosphère plus propres.

5. OPPORTUNITÉS DE PRÉVENTION ET DE RÉDUCTION DE LA POLLUTION

L'objectif du présent chapitre est de fournir un élément de réflexion aux techniciens et aux responsables des industries du secteur du ciment sur leurs propres procédés et alternatives technologiques plus respectueuses de l'environnement, ainsi qu'un guide aux autorités compétentes pour définir des politiques concrètes d'encouragement aux améliorations environnementales.

Pour ce faire, le présent chapitre détaille les informations disponibles sur les alternatives technologiques de prévention à la source et de réduction de la pollution dans l'industrie du ciment, pour les pays du plan d'action pour la Méditerranée. Concrètement, la méthode employée a été de réaliser une analyse des différentes techniques qui peuvent avoir un effet de réduction des émissions et de la consommation d'énergie, pendant la fabrication du ciment, notamment en ce qui concerne les niveaux de réduction espérés avec l'application de la technique concernée, sa possibilité réelle de mise en œuvre, les coûts d'investissement et d'exploitation ainsi que les inconvénients rencontrés pendant son utilisation à une échelle industrielle.

Les alternatives technologiques proposées sont variées, allant des modifications des systèmes traditionnels de production, en proposant dans certains cas des systèmes alternatifs en remplacement de certains processus de production ou d'exploitation, jusqu'à des alternatives pour le contrôle des émissions finales de ces installations. Ainsi, les alternatives technologiques proposées sont complétées par d'autres mesures à caractère général, basées sur les bonnes pratiques et la motivation du personnel et permettant conjointement d'optimiser chaque installation industrielle.

Les alternatives ont été classées de la manière suivante :

- Alternatives technologiques à caractère général ;
- Alternatives technologiques pour une gestion correcte de l'énergie ;
- Alternatives technologiques pour le contrôle des émissions de NO_x ;
- Alternatives technologiques pour le contrôle des émissions de SO₂ ;
- Alternatives technologiques pour le contrôle des émissions de particules ;
- Alternatives technologiques pour le contrôle des COV ;
- Alternatives technologiques pour le contrôle des PCDD/F ;
- Alternatives technologiques pour le contrôle des émissions de métaux ;
- Alternatives technologiques pour le contrôle des émissions de CO₂ ;
- Alternatives technologiques pour le contrôle des odeurs ;
- Alternatives technologiques pour le contrôle du bruit ;
- Alternatives technologiques pour le contrôle des vibrations ;
- Alternatives technologiques pour le contrôle des déchets ;
- Techniques émergentes.

Toutes ces alternatives sont détaillées et certaines d'entre elles sont présentées sous forme de fiche (lorsqu'elles sont considérées comme des alternatives d'un intérêt majeur, voir 5.1.1. *Fiche théorique*), qui fournit dans la mesure du possible une description de l'alternative, ainsi que les avantages

environnementaux et économiques de son implantation, sans oublier ses coûts d'investissement dans les usines nouvelles et les usines existantes. Les alternatives présentées ne sont pas exclusives, ni les seules possibles, puisque les usines adoptent en général plusieurs mesures simultanément, comme les cas pratiques le décrivent.

Les données économiques présentées proviennent du document de référence BREF (« Reference Document on Best Available Techniques in the Lime and Cement Manufacturing Industries », année 2000), du document BAT (« Best Available Techniques » de Cembureau, année 1997) et du document « The Impact of Best Available techniques (BAT) on the Competitiveness of the European Cement Industry », année 2001. Ces données sont fournies à titre indicatif et sont présentées comme des références de l'ordre de grandeur des différentes alternatives, normalement exprimées en millions d'euros (M€). Les coûts d'investissement ne comprennent pas les coûts supplémentaires de l'équipement ou des constructions de génie civil nécessaires pour l'implantation de la mesure concernée.

Il faut tenir compte du fait que l'application de ces mesures dans une usine nouvelle présente des aspects totalement différents de l'application de ces mesures dans une usine existante. En outre, l'application de ces techniques reste conditionnée par des aspects locaux propres à chaque cimenterie et, par conséquent, l'information fournie dans ce chapitre ne peut être considérée comme applicable à toutes et à chacune des installations de fabrication, ni en ce qui concerne la possibilité pratique d'appliquer les techniques mentionnées, ni en ce qui concerne les niveaux d'émission associés.

Les usines qui réalisent des améliorations dont le coût est élevé, comme par exemple des augmentations significatives de capacité et/ou de modification des processus, sont également considérées comme des usines nouvelles. En revanche, les usines qui réalisent des améliorations dont le coût est moindre, comme la modernisation de zones ou d'équipements limités, sont considérées comme des rénovations et entrent dans la même catégorie que les usines existantes.

FICHE THÉORIQUE	
Action	Action : prévention à la source (substitution de matières premières, changements technologiques, bonnes pratiques environnementales) ou traitement final.
Étape du processus	Étape ou opération à laquelle s'applique l'alternative. Dans le processus de fabrication du ciment, il est possible de distinguer les étapes suivantes : obtention des matières premières, préparation et stockage des matières premières, préparation et stockage des combustibles, cuisson du clinker, broyage et stockage du ciment, expédition.
Problématique environnementale	Impacts les plus importants sur l'environnement, induits par le processus de production original, minimisés ou diminués avec l'application de l'alternative.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Principaux avantages obtenus avec l'application de l'alternative.
Description	Bases scientifiques et technologiques sur lesquelles se fonde l'alternative, et description de son fonctionnement.
Procédure	Description des applications les plus utilisées pour intégrer l'alternative dans le processus de production.
Commentaires	Information supplémentaire donnée en complément des sections précédentes.
Aspects économiques	Chaque fois que cela sera possible, une orientation économique des coûts d'implantation et d'exploitation des alternatives sera fournie. Les données présentées proviennent du document de référence : BREF, Reference Document on Best Available Techniques in Cement Industry (2001).

5.1. ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES À CARACTÈRE GÉNÉRAL

Outre la mise en place de l'usine de production, si possible, à proximité de l'usine d'extraction pour éviter les impacts environnementaux associés au transport des matières premières (consommation d'énergie, émissions des véhicules, émissions diffuses de particules dans l'atmosphère et bruit), il existe d'autres alternatives technologiques pour la fabrication de ciment, reposant sur une série de mesures essentielles générales :

- **Optimisation du contrôle de processus** : grâce à des systèmes de contrôle automatique, des systèmes experts, etc., il est possible d'obtenir un processus stable et uniforme, avec un fonctionnement proche des valeurs de consigne des paramètres du processus, ce qui est avantageux pour toutes les émissions du four ainsi que pour la consommation énergétique ;
- **Contrôle des substances qui entrent dans le processus** et qui, en fonction de l'endroit où elles entrent et de la manière dont elles sont traitées, peuvent avoir un effet direct ou indirect sur les émissions du four (soufre et composés organiques volatils dans la matière première, métaux lourds, composés chlorés) ;
- **Réduction de la consommation des ressources**. La valorisation maximale des matériaux employés dans la fabrication du ciment réduit la consommation totale de matières premières. Par exemple, la poussière capturée par le filtre du four à clinker peut être recyclée dans le processus. L'emploi de déchets aptes au remplacement des matières premières réduit la consommation des ressources naturelles, mais il est important de toujours le faire avec un contrôle adéquat des substances introduites dans le four.
- **Réduction du rapport clinker/ciment**. Une technique pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de l'industrie du ciment, exprimée par unité de ciment produite, consiste à réduire le contenu de clinker. Tout ce qui induit une réduction de la proportion de clinker, pour l'élaboration duquel il est nécessaire de fritter les matériaux à des températures d'environ 1 450 °C dans un four rotatif, entraîne une réduction des émissions totales par unité de ciment produite.

Alternative	5.1.1. OPTIMISATION DU CONTRÔLE DU PROCESSUS
Action	Action : prévention à la source de la pollution. Bonnes pratiques environnementales.
Étape du processus	Procédé de production du ciment.
Problématique environnementale	Génération d'émissions dans l'atmosphère et consommation énergétique.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Les principaux avantages de l'application de cette alternative sont les suivants : <ul style="list-style-type: none"> • Réduction de la consommation de combustible ; • Réduction de la consommation énergétique ; • Réduction des émissions dans l'atmosphère (particules, NO_x, SO₂, CO, etc.).
Description	L'optimisation du processus de production du ciment implique le contrôle du flux de matière dans l'ensemble du système de production. Les résultats délivrés par le laboratoire, comme les analyses réalisées périodiquement dans différents points du processus de production, fournissent des informations appropriées pour le réglage des points clé de l'usine et des systèmes de contrôle. Le degré d'automatisation varie entre l'option d'automatisation totale, allant du traitement de l'échantillon jusqu'à l'analyse, incluant les réglages des paramètres du processus de production, et l'automatisation partielle dans le cadre du laboratoire.

	<p>L'exigence de précision et de reproductibilité analytique et une efficacité croissante des laboratoires ont motivé les investissements dans des laboratoires automatisés, produisant des données avec des informations de qualité sur les matières premières, le combustible, le processus et le produit final.</p> <p>L'optimisation du processus de clinkérisation, grâce à la stabilisation des paramètres du processus, sert normalement à réduire la consommation spécifique du combustible, afin d'augmenter la qualité du clinker et la longévité des équipements (revêtement réfractaire par exemple).</p> <p>La réduction des émissions comme les particules, les NO_x et le SO₂, est un effet secondaire, conséquence de cette optimisation. Une exploitation modérée et stable du four, avec des paramètres du processus proches des valeurs de conception, entraîne des avantages pendant le fonctionnement du four et génère moins d'émissions.</p> <p>L'optimisation comprend les mesures suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'homogénéisation des matières premières ; • La sécurité du dosage uniforme de combustible ; • L'optimisation du fonctionnement du refroidisseur. <p>Ainsi, pour garantir une vitesse d'alimentation du combustible solide uniforme, avec des pics minimaux, il est essentiel de disposer de trémies, de convoyeurs et de distributeurs de bonne conception, ainsi que d'un système moderne d'alimentation gravimétrique du combustible solide.</p>
<p>Procédure</p>	<p>La réduction de la température de la flamme, la diminution du combustible, ainsi que la formation de zones à atmosphère réductrice dans le four, entraînent moins d'émissions de NO_x. Le contrôle du contenu en oxygène est fondamental pour le contrôle des NO_x. Généralement, plus le contenu en oxygène est faible en sortie de four, moins la production de NO_x est importante. Néanmoins, il est nécessaire d'arriver à un équilibre entre la production des NO_x et la production de CO et SO₂, puisqu'en diminuant le pourcentage d'oxygène, la production de CO et SO₂ augmente.</p> <p>En appliquant des techniques d'optimisation au contrôle du processus, des réductions de NO_x jusqu'à 30 % ont été atteintes et répertoriées. Néanmoins, les expériences d'application des systèmes d'optimisation du processus indiquent que la réduction des émissions de NO_x présente des valeurs plus modestes et qu'elle n'est pas quantifiable a priori, puisqu'elle dépend des émissions de départ et de nombreux autres facteurs.</p> <p>La réduction des émissions de SO₂ provient de la diminution de sa volatilité à des températures de flamme et de combustion plus faibles, et de l'atmosphère oxydante du four, associée à un fonctionnement stable de celui-ci. L'effet positif du contrôle de processus sur les émissions de SO₂ est marginal pour les fours avec préchauffeurs, alors qu'il est considérable pour les fours longs (à voie sèche et humide), pour lesquels des réductions des émissions de SO₂ jusqu'à 50 % ont été répertoriées [Cembureau, 1997].</p> <p>Dans les fours avec précipitateurs électrostatiques, les émissions de particules sont réduites et de cette façon, il en est de même pour les émissions de toute autre substance absorbée par ces particules, comme par exemple les métaux.</p>
<p>Commentaires</p>	<p>L'optimisation du fonctionnement du four peut être appliquée à tous les types de four et inclut de nombreux facteurs, allant de la formation des opérateurs du four jusqu'à l'installation de nouveaux équipements, comme des systèmes de dosage, des silos d'homogénéisation, des lits de prémélange ou des modifications du refroidisseur de clinker.</p>

Aspects économiques	<p>Le coût de ces mesures, par conséquent, est très variable, compris entre 0 et 5 millions d'euros [Cembureau, 1997]. L'efficacité de ces mesures est également très variable, en fonction de chaque installation, des niveaux de départ des émissions et de nombreux autres facteurs.</p> <p>Différents fournisseurs d'équipements pour l'industrie du ciment ont développé des systèmes de contrôle experts, basés généralement sur le contrôle de la combustion en prenant comme référence les niveaux de NO_x. L'investissement nécessaire pour un système informatique du contrôle de haut niveau est d'environ 300 000 €, un investissement supplémentaire pouvant être nécessaire pour l'installation des systèmes requis de dosage et de mesure sur le site [Cembureau, 1997].</p>
---------------------	---

Alternative	5.1.2. ADÉQUATION ET CONTRÔLE DES SUBSTANCES QUI ENTRENT DANS LE PROCESSUS
Action	Action : prévention à la source de la pollution. Bonnes pratiques environnementales et/ou remplacement des matières premières.
Étape du processus	Procédé de production du ciment.
Problématique environnementale	Production d'émissions dans l'atmosphère.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Réduction de la production des émissions dans l'atmosphère.
Description	Sélection et contrôle des substances qui entrent dans le processus, comme matières premières ou comme combustibles.
Procédure	Certains combustibles et certaines matières premières peuvent présenter des contenus élevés en azote, soufre, métaux lourds ou composés organiques, qui affectent les émissions respectives de NO _x , SO ₂ , métaux lourds ou COV. Grâce à l'application de cette technique, en sélectionnant des matières premières et des combustibles appropriés, il est possible d'éviter ces émissions.
Commentaires	L'état physique des combustibles affecte également la production de NO _x . Ainsi, par exemple, les combustibles liquides peuvent être contrôlés plus facilement et génèrent moins d'émissions de NO _x que les combustibles solides, à cause de la réduction de la formation du point chaud. Pour les combustibles solides, l'évolution des NO _x thermiques paraît être liée à la granulométrie, dans le sens que plus celle-ci est faible, plus les émissions de NO _x le seront également, probablement en liaison, là aussi, avec la formation du point chaud. C'est pourquoi il est important de contrôler la granulométrie du combustible.
Aspects économiques	Il est impossible de fournir une estimation des coûts, puisqu'elle dépend en grande partie du marché des matières premières et des combustibles.

Alternative	5.1.3. RÉDUCTION DE LA CONSOMMATION DES RESSOURCES NATURELLES (MATIÈRES PREMIÈRES)
Action	Action : prévention à la source de la pollution. Bonnes pratiques environnementales, remplacement des matières premières.
Étape du processus	Procédé de production du ciment.
Problématique environnementale	Consommation des ressources naturelles, impact environnemental à cause de la mise au rebut des déchets industriels dans les sites d'enfouissement.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Réduction de la consommation des ressources naturelles. Élimination de l'impact visuel provoqué par la mise au rebut des déchets dans les sites d'enfouissement.
Description	La valorisation maximale des matériaux employés dans la fabrication du ciment, ainsi que leur substitution par des déchets d'autres processus industriels, réduit la consommation totale des matières premières.
Procédure	<p>L'industrie du ciment emploie certains déchets et sous-produits minéraux de composition similaire à celle de ses matières premières ou qui, une fois intégrés, améliorent les caractéristiques des ciments. Compte-tenu des énormes quantités de matières premières traitées par le secteur, ce recyclage suppose une grande économie de ressources naturelles et évite la mise au rebut de grands volumes de matériaux utilisables.</p> <p>L'utilisation de déchets et de sous-produits minéraux comme matières premières dans le processus de fabrication du ciment apporte les bénéfices suivants à l'environnement :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Réduction de l'exploitation des carrières, en remplaçant les ressources naturelles par des déchets ; • Diminution de l'occupation des sites d'enfouissement et des impacts associés. <p>Un autre exemple de valorisation des sous-produits est l'utilisation de la poussière capturée dans le filtre du four à clinker, en la recyclant dans le processus de broyage du cru.</p>
Commentaires	<p>Les matériaux susceptibles d'être employés comme matières premières peuvent être des sous-produits d'autres processus industriels comme :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cendres de pyrite, à cause de leur contenu élevé en fer ; • Laitier sec de haut-fourneau ; • Boues de papeterie, à cause de leur contenu élevé en carbonate de calcium ; • Sables de fonderie, à cause de leur contenu élevé en oxyde de silicium ; • Déchets de démolition, de nature calcique ou siliceuse. <p>L'emploi de déchets, aptes au remplacement des matières premières, réduit la consommation des ressources naturelles, mais il est important de toujours le faire avec un contrôle adéquat des substances introduites dans le four.</p>

Aspects économiques	Les cimenteries sont rémunérées pour leur gestion des déchets. En économisant sur le coût de la matière première remplacée, elles peuvent proposer un prix compétitif par rapport à la mise au rebut des déchets dans les sites d'enfouissement ou à leur traitement dans des incinérateurs spécialisés. Néanmoins, sur l'arc méditerranéen, il existe des prix de mise au rebut suffisamment faibles pour qu'aucune technologie de gestion des déchets ne puisse être compétitive par rapport aux sites d'enfouissement, entraînant ainsi un non-respect dans la hiérarchie de la gestion des déchets.
---------------------	---

Alternative	5.1.4. RÉDUCTION DU RAPPORT CLINKER/CIMENT
Action	Action : prévention à la source de la pollution. Bonnes pratiques environnementales.
Étape du processus	Broyage du ciment.
Problématique environnementale	Génération d'émissions dans l'atmosphère et consommation énergétique.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Réduction de la consommation en énergie et de la production des émissions dans l'atmosphère. Élimination de l'impact visuel provoqué par la mise au rebut des déchets dans les sites d'enfouissement.
Description	Cette technique permet de réduire la consommation d'énergie et les émissions de l'industrie du ciment, exprimée par unité de ciment produite, grâce à la réduction du contenu du clinker, par tonne de ciment.
Procédure	<p>Certains matériaux sont susceptibles d'être utilisés comme composants lors du broyage du ciment (comme adjuvants au clinker), puisqu'ils améliorent ses propriétés, comme la maniabilité, la rétention d'eau, la longévité, la résistance mécanique, la résistance aux sulfates, la résistance au gel, etc.</p> <p>Ainsi, par conséquent, l'ajout de minéraux lors du broyage du ciment réduit la proportion de clinker, ce qui entraîne une réduction des émissions totales par unité de ciment produite.</p> <p>L'utilisation des déchets et des sous-produits minéraux, comme adjuvants au clinker, apporte les bénéfices suivants à l'environnement :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diminution de la consommation énergétique pour fabriquer moins de clinker, grâce à l'utilisation des adjuvants. • Réduction des émissions dans l'atmosphère en diminuant la consommation de combustibles.
Commentaires	<p>Les matériaux susceptibles d'être employés comme substituts du clinker peuvent être naturels ou provenir de sous-produits d'autres processus industriels comme :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pouzzolanes naturelles ou industrielles ; • Cendres volantes de centrale thermique ; • Laitier de haut-fourneau ; • Fumée de silice de l'industrie des ferro-alliages ; • Schistes calcinés.

Aspects économiques	<p>Grâce à l'utilisation d'adjuvants naturels ou de déchets industriels, comme substituts de clinker, un avantage économique est obtenu avec la réduction du coût de l'énergie pour la production du clinker de substitution.</p> <p>Les cimenteries sont rémunérées pour leur gestion des déchets. En économisant sur le coût de la matière première remplacée, elles peuvent proposer un prix compétitif par rapport à la mise au rebut des déchets dans les sites d'enfouissement ou à leur traitement dans des incinérateurs spécialisés. Néanmoins, sur l'arc méditerranéen, il existe des prix de mise au rebut suffisamment faibles pour qu'aucune technologie de gestion des déchets ne puisse être compétitive par rapport aux sites d'enfouissement, entraînant ainsi un non-respect dans la hiérarchie de la gestion des déchets.</p>
---------------------	--

5.2. ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR UNE GESTION CORRECTE DE L'ÉNERGIE

Les meilleures opportunités existantes, pour augmenter le rendement énergétique du processus de fabrication du ciment, se situent à l'étape de cuisson du clinker :

- Mesures intégrales d'optimisation énergétique du processus ;
- Améliorations du procédé par voie sèche ;
- Préchauffeurs en suspension ;
- Refroidisseur moderne à grille et va-et-vient.

Les opportunités suivantes d'optimisation de la consommation d'énergie dans les processus de concassage et de broyage peuvent également être considérées :

- Technologies de broyage pour la préparation des matières premières ;
- Broyeur à cylindres pour la préparation du combustible ;
- Mesures intégrales d'optimisation énergétique du broyage final du ciment.

Enfin, il existe la possibilité de reformuler le produit, avec pour objectif d'améliorer le rendement énergétique (voir la section 5.1. *Alternatives technologiques à caractère général*) :

- Contenu en alcalis du ciment ;
- Réduction du rapport clinker/ciment.

Le tableau suivant résume les transformations possibles, pour améliorer l'efficacité énergétique, qui peuvent être réalisées dans le four d'une cimenterie existante.

Tableau 5.2.1. Possibilités de transformation des types de four.

DE / VERS	Humide	Semi-humide	Semi-sec	Sec et long	Sec avec préchauffeur	Sec avec précalcinateur	Vertical
Humide		√	√		√	√	
Semi-humide					√	√	
Semi-sec					√	√	
Sec et long					√	√	
Sec avec préchauffeur						√	
Sec avec précalcinateur							
Vertical							√

Source : IPTS, 2003.

Alternative	5.2.1. MESURES INTÉGRALES D'OPTIMISATION ÉNERGÉTIQUE DU PROCESSUS
Action	Action : prévention à la source de la pollution. Bonnes pratiques environnementales et/ou changements technologiques.
Étape du processus	Cuisson du clinker.
Problématique environnementale	Consommation énergétique.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	<p>Une augmentation de l'efficacité énergétique à l'étape de cuisson implique toujours une diminution de toutes les émissions associées directement au processus de combustion (NO_x, SO₂, CO₂), ainsi qu'une réduction de l'utilisation des ressources naturelles, dans le cas où celles-ci seraient utilisées comme combustible.</p> <p>Ainsi, l'économie réalisée sur la consommation électrique et ses pertes associées (transport et production) se répercute indirectement sur la pollution provenant du processus de production électrique.</p>
Description	Les mesures d'optimisation énergétique du processus de cuisson s'entendent comme les mesures améliorant l'efficacité énergétique qui peuvent être identifiées dans le processus. Ces mesures proviennent de la réalisation d'un audit énergétique sur toute l'installation, permettant d'identifier les opportunités associées aux consommations énergétiques détaillées dans le tableau 5.4.1.

<p>Procédure</p>	<p>Diminution des pertes associées aux gaz de combustion du four</p> <ul style="list-style-type: none"> • Installation de dispositifs qui augmentent le transfert de chaleur des gaz vers les matériaux ; • Fonctionnement avec des niveaux d'oxygène optimaux ; • Optimisation de la géométrie de la flamme du brûleur et de sa température ; • Amélioration ou ajout de capacité à l'étape de préchauffage. <p>Réduction des possibilités d'absorption énergétique des matières premières et du combustible (par exemple, réduction de la teneur en eau)</p> <p>Diminution de la teneur en poussière dans les gaz de combustion, en réduisant les turbulences du gaz</p> <p>Diminution de la température de déchargement du clinker</p> <p>Réduction des pertes par rayonnement du four, en utilisant des mélanges corrects et des revêtements réfractaires plus efficaces</p> <p>Réduction de la température de sortie des gaz en provenance du refroidisseur</p> <ul style="list-style-type: none"> • Amélioration de l'efficacité du refroidisseur (par exemple, réduction de l'air en excès, contrôle de l'épaisseur de la chambre du clinker ou installation de nouvelles grilles) ; • Recyclage de l'air de refroidissement en excès ; • Utilisation de l'air de décharge pour le séchage des matières premières et des combustibles ou pour le préchauffage des combustibles ou de l'air. <p>Diminution des fuites d'air</p> <ul style="list-style-type: none"> • Élimination des ouvertures inutiles ; • Fourniture de joints énergétiquement plus efficaces ; • Fonctionnement avec une température d'air primaire la plus élevée possible. <p>Mesures générales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Existence de programmes de gestion d'énergie ; • Existence des programmes de maintenance (isolants, systèmes d'air comprimé, etc.) ; • Moteurs à haut rendement ; • Ventilateurs à haut rendement avec des moteurs à vitesse variable ; • Optimisation des systèmes à air comprimé.
<p>Commentaires</p>	<p>Toutes les mesures ne peuvent être appliquées à toutes les cimenteries. Leur mise en application dépend de l'état actuel et futur de l'usine.</p> <p>Bien que les changements technologiques réduisent la consommation en énergie, le changement des habitudes et des comportements du personnel employé dans l'usine peut avoir un impact important sur l'efficacité énergétique.</p>
<p>Aspects économiques</p>	<p>L'investissement peut être très variable, en fonction de l'état de la cimenterie et des mesures adoptées.</p>

	<p>L'impact économique dû à l'économie d'énergie peut être double :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diminution du combustible ou des kWh électriques consommés par tonne de clinker ; • Diminution des coûts environnementaux (comme l'achat des droits d'émission de CO₂ dans les pays correspondants ou la diminution des coûts du traitement final de la pollution).
--	---

Alternative	5.2.2. AMÉLIORATIONS DU PROCÉDÉ PAR VOIE SÈCHE
Action	Action : prévention à la source de la pollution. Changements technologiques.
Étape du processus	Cuisson du clinker.
Problématique environnementale	Génération d'émissions dans l'atmosphère et consommation énergétique.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Réduction de la production des émissions dans l'atmosphère et valorisation énergétique.
Description	<p>Cette fiche détaille les améliorations possibles de la réduction de l'énergie thermique dans un four à voie sèche déjà installé, grâce à l'ajout d'un préchauffeur et d'un précalcinateur à l'extérieur du four :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conversion d'un four long à voie sèche en un four avec préchauffeur ; • Conversion d'un four avec préchauffeur en un four avec préchauffeur et précalcinateur ; • Conversion d'un four long en un four avec préchauffeur et précalcinateur.
Procédure	<p>Les fours longs à voie sèche sont pratiquement obsolètes.</p> <p>Comme mentionné dans l'alternative précédente, grâce à un préchauffage à l'extérieur du four, il est possible de le raccourcir, ce qui réduit les pertes en chaleur et augmente le rendement énergétique de l'installation globale. C'est le cas des échangeurs à cyclones, placés avant le four, pour les procédés par voie sèche. Il peut exister plusieurs étages de cyclones, avec préchauffage à 2 étages, 4 étages et 6 étages pour les plus modernes.</p> <p>En outre, grâce à un précalcinateur placé après les cyclones, il est possible de déplacer le processus de décarbonatation du four rotatif et, par conséquent, d'améliorer les consommations spécifiques grâce à l'effet de réduction de la taille du four et à l'amélioration de la qualité de l'échange thermique.</p> <p>Le tableau suivant récapitule la consommation d'énergie en fonction de chaque type de four et il est possible d'observer la diminution par rapport à l'augmentation des étapes à cyclones, à l'ajout d'un précalcinateur et à l'installation d'un refroidisseur à haute efficacité.</p>

Tableau 5.2.2. Consommation particulière par type de four.

Type de four	Consommation (MJ/tonne de clinker)
Procédé sec	4 500
Préchauffeur à 1 étage de cyclones	4 200
Préchauffeur à 2 étages de cyclones	3 700
Préchauffeur à 4 étages de cyclones	3 350
Préchauffeur à 4 étages et précalcinateur	3 200
Préchauffeur à 5 étages, précalcinateur et refroidisseur à haute efficacité	3 000
Préchauffeur à 6 étages, précalcinateur et refroidisseur à haute efficacité	2 900

Source : Cembureau, 1997 et Cement Industry Federation.

Commentaires

- Conversion d'un four long à voie sèche en un four avec préchauffeur à X étapes.

L'installation de préchauffeurs en suspension à plusieurs étapes réduit les pertes de chaleur existantes dans un four long équipé de chaînes et augmente le rendement énergétique du système.

Avec les nouveaux préchauffeurs, la productivité du four augmente puisque 40 % de la calcination est effectuée avant l'entrée dans le four. En outre, la longueur du four est raccourcie de 20 à 30 %, ce qui réduit les pertes par rayonnement. Puisque la capacité de la cimenterie augmente, le refroidisseur de clinker devra être adapté en fonction du nouveau volume de production.

L'économie d'énergie dépend de la consommation énergétique du type de four sec et du nombre de préchauffeurs installés (voir le tableau 5.2.2. *Consommation particulière par type de four*).

- Conversion d'un four avec préchauffeur en un four avec préchauffeur et précalcinateur à plusieurs étapes.

L'installation d'un précalcinateur entraîne généralement une augmentation de la capacité de l'usine tandis que la consommation spécifique de combustible et les émissions de NO_x thermiques diminuent (à cause de la faible température de combustion dans le préchauffeur).

Généralement, cette conversion implique la conservation du four, des fondations et des tours, mais le remplacement du refroidisseur et du précalcinateur par d'autres adaptés à la nouvelle capacité de l'usine.

L'économie de combustible dépend fortement de l'efficacité du four existant et des nouveaux paramètres du processus. (Par exemple le degré de précalcination, l'efficacité du refroidissement, etc.).

La conversion d'un four rotatif d'une cimenterie italienne a permis d'augmenter la capacité de 80 à 100 % (passant de 1 100 t/jour à 2 000 - 2 200 t/jour), tout en réduisant la consommation spécifique de combustible de 3,06 à une plage de 2,63 à 2,74 GJ/tonne de clinker, ce qui représente une économie de 11 à 14 % [Sauri, 1993].

	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Conversion d'un four long en un four avec préchauffeur et précalcinateur.</u> Cette option comprend les deux améliorations mentionnées précédemment, en les réalisant en une seule étape. Si cette conversion est économiquement viable, l'économie d'énergie est estimée à 1,2 GJ/tonne de clinker par rapport au four long à voie sèche.
Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Conversion d'un four long à voie sèche en un four avec préchauffeur en X étapes.</u> La conversion d'un four long peut être intéressante lorsque celui-ci nécessite d'être remplacé et lorsque l'installation d'un nouveau four se révèle trop cher. <i>Vleuven (1994)</i> estime les coûts à 25 \$ par tonne/an pour l'installation de préchauffeurs en suspension. • <u>Conversion d'un four avec préchauffeur en un four avec préchauffeur et précalcinateur à plusieurs étapes.</u> Pour l'installation d'un préchauffeur et d'un précalcinateur sur un four avec préchauffeur, les coûts d'investissement sont estimés à 15 \$ par tonne/an [<i>LBNL, 2004</i>]. Il est possible, avec l'augmentation de la capacité de production, d'économiser 1 \$ par tonne sur les coûts d'exploitation [<i>Jaccard and Willis, 1996</i>]. • <u>Conversion d'un four long en un four avec préchauffeur et précalcinateur.</u> Les coûts sont estimés à 25 \$ par tonne de clinker/an [<i>LBNL, 2004</i>].

Alternative	5.2.3. PRÉCHAUFFEURS EN SUSPENSION
Action	Action : prévention à la source de la pollution. Changements technologiques.
Étape du processus	Cuisson du clinker.
Problématique environnementale	Consommation énergétique.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Meilleure valorisation énergétique.
Description	L'installation de préchauffeurs en suspension réduit la consommation d'énergie du ventilateur des gaz de combustion du four.
Procédure	En fonction de l'efficacité du ventilateur, il est possible d'économiser entre 0,6 et 0,7 kWh/tonne de clinker pour chaque colonne d'eau de 50 mm de réduction en perte de charge. Pour de nombreux fours anciens, si ce type de système est installé, l'économie d'énergie peut atteindre 0,6 à 1 kWh/tonne de clinker [<i>Birch, 1990</i>].
Commentaires	Ce système présente l'inconvénient d'augmenter la charge en particules des gaz de combustion et, par conséquent, d'augmenter la quantité de particules déplacées de la tour du préchauffeur. Néanmoins, si l'équipement de broyage des matières premières se situe en ligne à la suite des préchauffeurs, le problème du déplacement des particules est moindre.

Aspects économiques	L'installation du système peut être coûteuse, cependant elle implique au moins une reconstruction ou la modification des tours du préchauffeur et, par conséquent, les coûts sont très variables en fonction des conditions particulières de chaque cimenterie.
---------------------	---

Alternative	5.2.4. REFROIDISSEUR À GRILLE ET VA-ET-VIENT MODERNE
Action	Action : prévention à la source de la pollution. Changements technologiques.
Étape du processus	Cuisson du clinker.
Problématique environnementale	Consommation énergétique.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Meilleure valorisation énergétique.
Description	Le refroidisseur à grille et va-et-vient est la variante moderne des refroidisseurs, qui s'installe dans pratiquement toutes les cimenteries avec des fours modernes d'une capacité supérieure à 10 000 t/jour. Il récupère plus de chaleur que les autres types de refroidisseur.
Procédure	<p>Les avantages du refroidisseur à grille sont sa grande capacité (permettant des fournées de grande taille) et la récupération efficace de la chaleur (la température du clinker qui sort du refroidisseur peut être de 83 °C au lieu de 120 à 200 °C comme c'est le cas des refroidisseurs planétaires [Vleuten, 1994].</p> <p>Les refroidisseurs modernes à va-et-vient augmentent l'efficacité de la récupération de chaleur de 65 % ou plus, tout en réduisant ses variations.</p>
Commentaires	La conversion ou l'installation de cette technologie est économiquement intéressante lorsqu'il est prévu d'installer un précalcinateur ou d'augmenter la capacité de l'usine. En effet, la récupération de l'air tertiaire nécessaire pour le précalcinateur est incompatible avec les refroidisseurs planétaires [Cembureau, 1997], limitant l'efficacité de la récupération de chaleur.
Aspects économiques	<p>Il s'agit de l'alternative préférée des cimenteries de grande capacité. Pour les usines qui produisent moins de 500 tonnes/jour, ce système peut se révéler très coûteux.</p> <p>L'investissement est estimé entre 0,4 et 5 \$ par tonne/an, en fonction du degré de reconstruction nécessaire. Les coûts annuels d'exploitation augmentent de 0,1 \$/tonne de clinker [Jaccard and Willis, 1996].</p>

Alternative	5.2.5. TECHNOLOGIES DE BROYAGE POUR LA PRÉPARATION DES MATIÈRES PREMIÈRES
Action	Action : prévention à la source de la pollution. Changements technologiques.
Étape du processus	Préparation des matières premières.
Problématique environnementale	Consommation énergétique.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Réduction de la production des émissions dans l'atmosphère et valorisation énergétique.
Description	<p>Le traditionnel broyeur à boulets utilisé pour le broyage des matières premières peut être remplacé par des broyeurs à cylindres à haut rendement énergétique, par des broyeurs à boulets combinés avec des presses à rouleaux à haute pression ou par des broyeurs à cylindres horizontaux. Ces technologies économisent de l'énergie sans compromettre la qualité du produit.</p> <p>La sélection du système de broyage peut varier selon les installations en fonction de nombreux facteurs. Alors que la consommation énergétique du broyeur à boulets est supérieure, celui-ci présente des coûts d'exploitation et de maintenance inférieurs à ceux des autres broyeurs. Les coûts d'investissements sont difficilement comparables de manière générale, puisque les contraintes spécifiques de l'emplacement jouent un rôle prépondérant. Les autres facteurs économiques qui influencent la sélection d'un broyeur sont le contenu en humidité des matières premières (les broyeurs verticaux peuvent sécher et broyer, alors que les presses à rouleaux et les broyeurs horizontaux nécessitent un séchoir indépendant) et la finesse souhaitée du produit. Certaines options consistent à utiliser deux types de broyeurs consécutifs, afin de profiter des avantages des deux solutions.</p> <p>L'installation de trieurs et de séparateurs à haute efficacité dans les broyeurs contribue, en outre, à une amélioration énergétique.</p>
Procédure	<p>Les <u>broyeurs à cylindres</u> nécessitent moins d'énergie et possèdent une capacité de séchage supérieure à celle des broyeurs à boulets, mais ils ne sont pas appropriés aux matériaux très abrasifs.</p> <p>Les broyeurs à cylindres disposent de capacités de traitement jusqu'à 400 t/h et présentent des besoins énergétiques particuliers inférieurs à ceux des broyeurs à boulets, autour de 10 à 14 kWh/t, puisqu'ils travaillent à des pressions plus élevées et qu'ils nécessitent une alimentation en eau relativement plus faible.</p> <p>Avec l'installation d'un broyeur à cylindres vertical ou horizontal, les économies énergétiques sont estimées entre 6 et 7 kWh/tonne de matière première [LBNL, 2004]. L'utilisation d'un broyeur horizontal permet d'obtenir une économie de 20 % par rapport à un broyeur à cylindres vertical [wbcsd, 2002].</p> <p>Le tableau suivant présente le pourcentage de consommation énergétique de chaque système de broyeur, par rapport au broyeur à boulets.</p>

	<p>Tableau 5.2.3. Pourcentage de consommation énergétique par rapport au broyeur à boulets.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Type de broyeur</th> <th>%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Broyeur à cylindres vertical</td> <td>70 - 75</td> </tr> <tr> <td>Broyeur à cylindres horizontal</td> <td>65 - 70</td> </tr> <tr> <td>Presse à rouleaux (ou broyeur à cylindres de haute pression)</td> <td>50 - 65</td> </tr> </tbody> </table> <p>Source : LBNL, 2000.</p> <p><u>Trieurs/Séparateurs à haut rendement :</u></p> <p>Ces trieurs séparent les particules fines des particules grosses de manière plus efficace et sélective, ce qui évite un surbroyage. Ils peuvent être utilisés autant pour le broyage des matières premières que pour le broyage final.</p> <p>Les économies électriques sont estimées à 8 % de la consommation spécifique. [LBNL, 2004].</p>	Type de broyeur	%	Broyeur à cylindres vertical	70 - 75	Broyeur à cylindres horizontal	65 - 70	Presse à rouleaux (ou broyeur à cylindres de haute pression)	50 - 65
Type de broyeur	%								
Broyeur à cylindres vertical	70 - 75								
Broyeur à cylindres horizontal	65 - 70								
Presse à rouleaux (ou broyeur à cylindres de haute pression)	50 - 65								
Commentaires	<p>L'avantage supplémentaire de l'installation en ligne d'un broyeur à cylindres vertical, c'est qu'il peut combiner le séchage des matières premières avec le processus de broyage, en utilisant la chaleur résiduelle du four ou du refroidisseur de clinker.</p> <p>En ce qui concerne l'installation de trieurs ou de séparateurs à haut rendement, le remplacement d'un trieur conventionnel par un trieur à haut rendement permet d'augmenter de 15 % la capacité de broyage et d'améliorer la qualité du produit, à cause d'une meilleure uniformité de la taille des particules. L'amélioration de la taille des matières premières implique une économie de la consommation de combustible dans le four et une augmentation de la qualité du clinker.</p>								
Aspects économiques	<p>Différentes conceptions de broyeur à cylindres sont disponibles sur le marché.</p> <p>L'installation d'un broyeur à cylindres implique un investissement estimé à 5 \$ par tonne de matière première [Holderbank, 1993].</p> <p>L'installation de trieurs ou de séparateurs entraîne un coût de 2 \$ par tonne de matière première/an [Holderbank, 1993].</p>								

Alternative	5.2.6. INSTALLATION DE BROYEUR À CYLINDRES POUR LA PRÉPARATION DU COMBUSTIBLE
Action	Action : prévention à la source de la pollution. Changements technologiques.
Étape du processus	Préparation du combustible.
Problématique environnementale	Réduction de la production des émissions dans l'atmosphère et valorisation énergétique.

<p>Bénéfices environnementaux de l'alternative</p>	<p>Réduction de la production des émissions dans l'atmosphère et valorisation énergétique.</p>								
<p>Description</p>	<p>La préparation du combustible est réalisée in situ. Elle peut inclure le concassage, le broyage et le séchage du charbon (le charbon est transporté humide pour empêcher la formation de poussière pendant le transport ; s'il est nécessaire de sécher le charbon, il est possible d'employer la chaleur résiduelle du four, par exemple celle du refroidisseur de clinker).</p> <p>Le broyeur à cylindres est un système de concassage et de broyage du combustible plus efficace énergétiquement que le broyage à boulets ou à percussion (voir le tableau 5.2.3. <i>Comparaison de la consommation énergétique des types de broyage</i>) [Cembureau, 1997].</p> <div data-bbox="708 719 1246 954" data-label="Image"> </div> <p>Figure 5.2.3. Broyeur à cylindres vertical.</p>								
<p>Procédure</p>	<p>L'avantage du broyeur à cylindres, c'est qu'il peut accepter le combustible sans concassage préalable (charbon de taille plus importante), ainsi que des types de charbon avec une humidité élevée, et qu'il peut contrôler des variations importantes du rendement. Néanmoins, pour les charbons abrasifs, il est préférable d'utiliser un broyeur à boulets.</p> <p>Les broyeurs à cylindres de charbon sont disponibles pour des rendements de 5 à 200 t/h.</p> <p>Le tableau suivant présente les valeurs de consommation pour les différents types de broyage du combustible. Il est possible d'observer comment la consommation énergétique du broyeur à cylindres est largement inférieure à celle du broyeur à boulets et à percussion.</p> <p>Tableau 5.2.4. Comparaison de la consommation énergétique des types de broyeurs.</p> <table border="1" data-bbox="512 1509 1439 1843"> <thead> <tr> <th>Type de broyeur</th> <th>Consommation (kWh/tonne de combustible)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Broyeur à boulets</td> <td>45 - 60</td> </tr> <tr> <td>Broyeur à percussion</td> <td>25 - 26</td> </tr> <tr> <td>Broyeur à cylindres</td> <td>16 - 18</td> </tr> </tbody> </table> <p>Source : Cembureau, 1997.</p>	Type de broyeur	Consommation (kWh/tonne de combustible)	Broyeur à boulets	45 - 60	Broyeur à percussion	25 - 26	Broyeur à cylindres	16 - 18
Type de broyeur	Consommation (kWh/tonne de combustible)								
Broyeur à boulets	45 - 60								
Broyeur à percussion	25 - 26								
Broyeur à cylindres	16 - 18								

Commentaires	De la même façon que pour le broyage des matières premières et le broyage final, il existe un système de presse à rouleaux généralement plus efficace que le broyage conventionnel. La presse à rouleaux peut être utilisée pour broyer les matières premières et le charbon, bien que l'équipement de broyage nécessite une protection spéciale contre les explosions.
Aspects économiques	Les coûts d'investissement d'un broyeur à cylindres sont généralement supérieurs aux coûts du broyeur à boulets ou du broyeur à percussion, mais les coûts d'exploitation sont inférieurs, environ 20 % de moins que les coûts du broyeur à boulets et 50 % de moins que ceux du broyeur à percussion [Cembureau, 1997]. L'économie est estimée entre 7 et 10 kWh/tonne de charbon.

Alternative	5.2.7. MESURES D'OPTIMISATION ÉNERGÉTIQUE DU BROYAGE FINAL DU CIMENT
Action	Action : prévention à la source de la pollution. Bonnes pratiques environnementales et changements technologiques.
Étape du processus	Broyage du ciment.
Problématique environnementale	Consommation énergétique.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Réduction de la production des émissions dans l'atmosphère et valorisation énergétique.
Description	Les mesures d'optimisation énergétique à l'étape de broyage final sont les mesures qui améliorent l'efficacité énergétique autant du contrôle que du type de broyeur ou des séparateurs.
Procédure	<p>Contrôle du procédé et gestion. Broyage</p> <p>Les systèmes de contrôle des opérations de broyage ont été développés en suivant la même philosophie que les systèmes de contrôle du processus (<i>voir la fiche 5.2.1</i>).</p> <p>Le système contrôle le flux d'entrée dans le broyeur et dans les séparateurs, afin d'obtenir un produit stable de haute qualité.</p> <p>Concepts du broyage avancé</p> <p>Le rendement énergétique des broyeurs à boulets utilisés pour le broyage final est relativement faible et la consommation est de 30 à 42 kWh/tonne de clinker, en fonction de la finesse du ciment [Cembureau, 1997]. Les nouveaux concepts de broyage, d'installation de presses à rouleaux, de broyeurs à cylindres et de presses à rouleaux pour un prébroyage en combinaison avec des broyeurs à boulets, peuvent diminuer cette consommation à 20 à 30 kWh/tonne de clinker.</p> <p>Pour le broyage final, normalement, des broyeurs verticaux avec balayage d'air sont utilisés avec des séparateurs. Actuellement, une nouvelle technologie qui commence à être utilisée consiste en un prébroyage dans des broyeurs à cylindres verticaux, sans balayage d'air, combinés avec un broyeur à boulets. L'ajout d'un système de prébroyage, situé avant le broyeur à boulets, implique une économie d'énergie comprise entre 6 et</p>

	<p>22 kWh/tonne de ciment. Une variante de la technologie du broyeur à cylindres est représentée par le broyeur à cylindres avec anneau à balayage d'air, qui présente une consommation de 23 kWh/tonne de ciment pour une granulométrie de ciment de 3 000 cm²/g.</p> <p>Un nouveau concept de broyeur à cylindres est le <i>Horomill</i>, un broyeur à cylindres horizontal compact qui peut produire le produit final en une seule étape. La pression générée par les cylindres est d'environ 700 à 1 000 bars [Marchal, 1997]. Ce type de broyeur consomme, pour le broyage du ciment Portland avec une granulométrie de 3 200 cm²/g, environ 21 kWh/t et moins de 25 kWh/t pour le broyage du ciment pouzzolanique avec une granulométrie de 4 000 cm²/g.</p> <p>Les entreprises qui ont installé un broyeur à cylindres horizontal bénéficient d'économies d'énergie supérieures à 20 % pour le broyage de matières premières (par rapport au broyeur à cylindres vertical) et de 40 % pour le broyage du ciment.</p> <p>Aujourd'hui, la presse à rouleaux à haute pression est utilisée fréquemment pour augmenter la capacité des broyeurs. Ce type de presse est composé de deux rouleaux qui pressent le matériau jusqu'à atteindre plus de 3 500 bars, en augmentant de manière drastique l'efficacité du broyage.</p> <p>Trieurs à haut rendement</p> <p>Ces trieurs séparent les particules fines des particules grosses de manière plus efficace et sélective, ce qui évite un surbroyage et entraîne par conséquent une économie d'énergie.</p> <p>Améliorations des équipements de broyage</p> <p>Notamment avec le broyeur à boulets, il est possible d'améliorer les équipements de broyage, pour qu'ils soient plus résistants à l'usure. Une augmentation de la charge de la distribution des boulets, de la dureté superficielle du moyen de broyage et du revêtement du broyeur résistant à l'usure, implique une économie de l'usure des équipements, ainsi que de la consommation d'énergie.</p>								
<p>Commentaires</p>	<p>Concepts de broyage avancé</p> <p>Le tableau suivant résume les consommations mentionnées dans le paragraphe précédent.</p> <p>Tableau 5.2.5. Comparaison de la consommation d'énergie des broyeurs du broyage final.</p> <table border="1" data-bbox="512 1534 1437 1895"> <thead> <tr> <th>Type de broyeur</th> <th>Consommation (kWh/ tonne de combustible)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Broyeur à boulets</td> <td>>30 - 42</td> </tr> <tr> <td>Broyeur à cylindres vertical avec broyeur à boulets</td> <td>23</td> </tr> <tr> <td>Broyeur à cylindres horizontal</td> <td>21 - 25(*)</td> </tr> </tbody> </table> <p>Source : LBNL, 2004.</p> <p>(*) En fonction du type de ciment et de sa granulométrie.</p>	Type de broyeur	Consommation (kWh/ tonne de combustible)	Broyeur à boulets	>30 - 42	Broyeur à cylindres vertical avec broyeur à boulets	23	Broyeur à cylindres horizontal	21 - 25(*)
Type de broyeur	Consommation (kWh/ tonne de combustible)								
Broyeur à boulets	>30 - 42								
Broyeur à cylindres vertical avec broyeur à boulets	23								
Broyeur à cylindres horizontal	21 - 25(*)								

	<p>Les économies d'énergie, dans le cas du remplacement d'un broyeur à boulets par un broyeur final de nouvelle technologie (broyeur à cylindres), sont estimées à 20 kWh/tonne de ciment [LBNL, 2004].</p>
Aspects économiques	<p>Concepts de broyage avancé</p> <p>Le broyeur à cylindres horizontal, un système compact et capable d'obtenir le produit final en une seule étape, représente des coûts d'investissement faibles.</p> <p>Pour l'installation d'une presse à rouleaux, le coût est estimé à environ 4 \$ par tonne/an de ciment.</p> <p>Les coûts d'investissement de la presse à rouleaux sont inférieurs à ceux des autres systèmes ou au moins comparables.</p> <p>Ces nouveaux concepts de broyage avancé permettent une réduction des coûts d'exploitation de 30 à 40 %.</p> <p>Trieurs à haut rendement</p> <p>Une étude réalisée en Grande-Bretagne a montré une réduction de l'utilisation de l'électricité de 6 kWh/tonne de ciment, après l'installation de ces trieurs pour le broyage final, et une augmentation de la production de 25 % [Parkes, 1990].</p> <p>Holderbank estime qu'il existe une réduction de 8 % de la consommation d'énergie (5 kWh/t), tandis que d'autres études l'estiment à 1,7 - 2,3 kWh/tonne de ciment [LBNL, 2004 ; LBNL, 2000].</p> <p>Les économies réelles varient en fonction de l'usine, du type de ciment et de la finesse requise. Par exemple, les économies électriques suite à l'installation de nouveaux séparateurs à haut rendement dans une cimenterie française (Origny-Rochefort) ont varié entre 0 et 5 kWh/tonne, pour un investissement de 2 \$ par tonne de matière finale à l'année. [LBNL, 2004].</p>

Alternative	5.2.8. RÉDUCTION DU FLUX DU BY-PASS D'ALCALIS
Action	Action : prévention à la source de la pollution. Changements technologiques.
Étape du processus	Cuisson du clinker.
Problématique environnementale	Réduction de la consommation énergétique.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Réduction de la production des émissions dans l'atmosphère et valorisation énergétique.
Description	<p>De nombreux clients réclamaient un ciment à faible contenu en alcalis parce qu'il leur permettait une plus grande liberté de choix de granulats pour la composition du béton. Aujourd'hui, ces exigences ont changé et il est possible de vendre un produit avec un contenu en alcalis plus important.</p> <p>D'un autre côté, dans certains pays, les matières premières possèdent un contenu élevé en alcalis (par exemple l'Égypte) et, par conséquent, le préchauffeur et le précalcinateur doivent être équipés d'un système de by-pass pour diminuer ce contenu. La réduction à l'aide d'un by-pass dépend en grande mesure du type de ciment souhaité.</p>

<p>Procédure</p>	<p>Pour obtenir une réduction du contenu en alcalis, un système de by-pass est utilisé pour les gaz chauds et les particules de la cimenterie, chargés en métaux alcalins. Le by-pass évite l'obstruction du préchauffeur, puisqu'il ne reçoit plus la totalité du flux des gaz de combustion du four et, par conséquent, moins de particules arrivent.</p> <p>Néanmoins, la production de ciment à faible contenu en alcalis est associée à une plus grande consommation d'énergie, puisque les gaz chauds sont extraits du processus de cuisson pour être utilisés dans le préchauffage et que la quantité de particules, qui pourraient faire partie du clinker, va en diminuant.</p> <p>Les économies sont estimées entre 2 et 5 Kcal/kg par pourcentage de gaz qui passe par le by-pass. La valeur la plus faible est attribuée aux fours avec précalcinateur et la plus forte aux fours avec préchauffeur.</p> <p>Normalement, le by-pass concerne entre 10 et 70 % des gaz de combustion du four. Par exemple, une réduction de 20 % de la quantité de gaz passant par le by-pass économiserait entre 0,16 et 0,4 GJ/tonne de clinker [LBNL, 2004].</p> <p>L'utilisation de cendres volantes et de laitier de haut-fourneau comme granulats peut réduire la nécessité de produire un ciment à faible contenu en alcalis.</p> <p>Figure 5.2.4. Processus de production avec by-pass d'alcalis.</p>
<p>Commentaires</p>	<p>Le changement de composition du ciment, à part le fait d'entraîner une économie d'énergie par la diminution de l'utilisation du by-pass d'alcalis, permet d'optimiser l'utilisation des nouvelles technologies de contrôle des NO_x, c'est-à-dire la diminution des émissions de NO_x et de particules, puisqu'il passerait plus de gaz par ce procédé alors que d'une autre manière (élimination par le by-pass), ils seraient émis directement dans l'atmosphère.</p> <p>Un autre avantage est la réduction des émissions de particules et la possibilité de recycler dans le four la production des particules générées par les gaz du by-pass, puisqu'une plus petite quantité ne provoquera pas l'obstruction du système</p>
<p>Aspects économiques</p>	<p>Il n'existe pas de coûts associés à cette alternative puisqu'il s'agit uniquement d'un changement du processus, mais elle peut entraîner des coûts supplémentaires pour les consommateurs, en induisant le remplacement des granulats utilisés par d'autres types pour la composition d'un béton avec les mêmes caractéristiques.</p>
	<p>Cette technique est un cas concret de la section 5.1.4 « RÉDUCTION DU RAPPORT CLINKER/CIMENT » et, par conséquent, il peut être supprimé.</p>

5.3. ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR LE CONTRÔLE DES ÉMISSIONS DE NO_x

Les alternatives technologiques à caractère général décrites dans la section 5.1, comme l'optimisation du contrôle de processus (en contrôlant le contenu en oxygène), la sélection des matières premières et des combustibles avec un contenu en azote plus faible, l'installation de préchauffeur/précalcinateur, entre autres, améliorent les émissions de NO_x à cause d'une moindre consommation d'énergie et de la conservation de la valeur de consigne dans les paramètres de conception ; en mettant l'accent sur ceux qui sont décisifs pour la formation des NO_x.

Les meilleures techniques disponibles pour la réduction des émissions de NO_x combinent des mesures primaires générales, précédemment exposées, et les techniques suivantes, décrites ci-après sous la forme de fiches :

- Brûleur à bas NO_x ;
- Refroidissement de la flamme ;
- Combustion par étapes ;
- Réduction non catalytique sélective (RNCS).

L'utilisation conjointe de la combustion par étapes et de la réduction non catalytique sélective est en phase de développement (voir la section 5.14. *Techniques émergentes*).

Certains fours modernes à voie sèche avec échangeur à cyclones et précalcinateur ont atteint des niveaux d'émission inférieurs à 500 mg/Nm³ (exprimés comme NO₂) ; dans certains cas, en utilisant uniquement des mesures primaires, et dans d'autres cas, en utilisant la combustion par étapes. Les caractéristiques de la matière première (difficulté de cuisson) et la conception du four peuvent empêcher d'atteindre ces valeurs.

La majorité des fours qui utilisent la RNCS maintiennent leurs émissions entre 500 et 800 mg/Nm³. Certaines installations ont atteint des valeurs d'émission inférieures à 200 mg/Nm³, bien que l'expérience cumulée dans ces cas précis reste encore insuffisante. Concrètement, les seules données disponibles proviennent de deux cimenteries, avec des périodes d'utilisation industrielle relativement courtes. L'une des questions préoccupantes soulevées par l'application de la RNCS est une fuite possible d'ammoniac, autant lors des opérations de transport et de stockage que sous forme d'émissions pendant son emploi comme réducteur.

Pour appliquer la technique RNCS dans un four à clinker, il est nécessaire d'avoir accès à une fenêtre de température d'environ 900 °C. C'est relativement facile pour les fours à voie sèche avec quatre étapes ou plus d'échangeurs, alors que c'est impossible pour les fours à voie semi ou à voie humide.

L'application de la technique de combustion par étapes nécessite que le four dispose d'un précalcinateur, conçu pour permettre des temps de séjour prolongés.

En ce qui concerne l'installation de brûleurs à bas NO_x, les résultats sont satisfaisants, bien que dans certains cas aucune réduction des émissions de NO_x n'ait pu être observée.

Par rapport aux niveaux associés aux techniques mentionnées, les remarques suivantes peuvent être formulées :

- Les fours neufs à voie sèche et précalcinateur, avec système de combustion par étapes, peuvent atteindre des valeurs d'émission de NO_x inférieures à 500 mg/Nm³ ;
- Les émissions des fours à voie sèche avec précalcinateur, mais sans système de combustion par étapes, se situent normalement dans la plage de 500 à 800 mg/Nm³ ;
- Les fours à voie sèche sans précalcinateur, auxquels sont appliquées les mesures primaires mentionnées précédemment, devraient normalement obtenir des valeurs d'émission inférieures à 1 200 mg/Nm³. Pour réduire les émissions de NO_x dans les fours à voie sèche avec échangeur à 4 étapes, l'injection d'ammoniac a été utilisée par 20 fours européens, qui ont obtenu de cette façon des valeurs inférieures à 800 mg/Nm³, valeurs qui entraînent en

contrepartie le transport et la manipulation de composés ammoniacaux, en plus de l'émission dans l'atmosphère de la portion d'ammoniac qui n'a pas réagi avec les NO_x ;

- Pour les fours à voie sèche avec moins de quatre étapes, à voie semi-humide et à voie humide, il n'existe aucune mesure secondaire qui se soit montrée efficace ; les valeurs atteintes sont celles qui résultent de la combinaison des techniques primaires.

Comme cela a déjà été mentionné à plusieurs reprises, les plages de valeur décrites sont de type général et il existe des cas pour lesquels les émissions d'une installation se situent sous la plage espérée par sa technologie, et d'autres où les caractéristiques des matières premières ou du processus produisent des valeurs d'émission supérieures aux plages décrites. Dans cette optique, il convient de souligner que les plages d'émission habituelles dans les nouvelles installations de clinker gris (comprises entre 500 et 800 mg/Nm³) sont, en général, inférieures à celles des installations existantes (comprises entre 800 et 1 200 mg/Nm³).

Le tableau suivant présente les caractéristiques d'application des différentes techniques de réduction des NO_x :

Tableau 5.3.1. Aperçu général des techniques de contrôle des émissions de NO_x.

Technique	Cas d'application	Efficacité de la réduction (%)	Émissions ⁽²⁾		Coûts ⁽³⁾	
			mg/m ³ (1)	kg/t (2)	Investissement	Exploitation
Brûleur à bas NO_x	Tous les fours	0 - 30	400	0,8	0,15 - 0,8	0
Refroidisseur de la flamme	Tous les fours	0 - 50	400	0,8	0 - 0,2	0 - 0,5
Combustion par étapes	Précalcinateur	10 - 50	< 500 à 1 000	< 0,1 à 2,0	0,1 - 0,2	0
	Préchauffage				1 - 4	0
RNCS	Préchauffage et précalcination	10 - 85	200 - 800	0,4 - 1,6	0,5 - 1,5	0,3 - 0,5

(1) Se réfère normalement à des moyennes journalières, gaz sec, 273 K, 101,3 kPa et 10 % O₂.

(2) kg/tonne de clinker : basé sur 2 000 m³t de clinker.

(3) Les coûts d'investissement sont exprimés en M€ et les coûts d'exploitation en €/tonne de clinker, en référence normalement à une capacité de four de 3 000 tonnes de clinker par jour et à une émission initiale supérieure à 2 000 mg de NO_x/Nm³.

Source : Cembureau.

Alternative	5.3.1. BRÛLEUR À BAS NO _x
Action	Action : prévention à la source. Changements technologiques.
Étape du processus	Cuisson du clinker.
Problématique environnementale	Production d'émissions de NO _x dans l'atmosphère.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	<p>Bien que l'installation n'atteigne pas toujours une réduction des émissions de NO_x, des réductions jusqu'à 30 % de ces émissions ont été obtenues [Int. Cem. Rev., octobre 1997] dans les fours où ce type de brûleurs a le plus de succès, quoique la valeur de 10 % de réduction soit rarement dépassée.</p> <p>Ces brûleurs à bas NO_x peuvent être installés dans tous les fours rotatifs ayant obtenus des niveaux d'émission de 600 à 1 000 mg/Nm³ [Rapport Dutch, 1997].</p>
Description	Le principe de cette technique est basé sur la réduction des points chauds localisés, grâce à l'envoi de gaz dans le vortex et sous de faibles ratios d'air primaire.
Procédure	<p>La formation des oxydes d'azote se produit, à l'exception d'une faible proportion, dans les combustibles qui contiennent un azote organique issu de la combinaison chimique entre l'azote et l'oxygène de l'air. Les conditions à éviter pour minimiser la formation des NO_x sont les hautes températures de combustion et une atmosphère oxydante.</p> <p>Dans les brûleurs à faible émission de NO_x, la zone de combustion centrale présente un déficit en air, de manière à ce que la température dans cette zone soit limitée par ce manque d'air et que l'atmosphère soit réductrice ; la combustion est alors complétée par l'introduction d'air secondaire dans la zone extérieure à la flamme.</p> <p>Les brûleurs à bas NO_x varient dans le détail, mais fondamentalement, le combustible et l'air sont injectés à l'intérieur du four via des tubes concentriques. La proportion d'air primaire est réduite à 6 - 10 % de ce qui est nécessaire pour la combustion stœchiométrique, normalement autour de 13 % dans les brûleurs à combustion indirecte [World Cement, avril 1990] ou à 20 - 25 % dans les brûleurs traditionnels à combustion directe. L'air axial est injecté avec un moment élevé dans la canalisation extérieure.</p> <p>Le combustible peut être injecté dans la conduite centrale ou par la canalisation moyenne. Une troisième canalisation est utilisée pour l'air dans le vortex, injecté par des pales à la sortie de la buse.</p> <p>L'effet net de la conception de ce brûleur consiste à produire une ignition très rapide, notamment des composés volatils du combustible, dans une atmosphère pauvre en oxygène, ce qui tendra à réduire la formation des NO_x.</p>
Commentaires	Les brûleurs à faible émission de NO _x peuvent être utilisés dans des installations existantes ou neuves.
Aspects économiques	Les coûts d'investissement pour un brûleur à bas NO _x sont d'environ 150 000 à 350 000 € pour un four d'une capacité de 3 000 tonnes de clinker/jour [Cembureau, 1997] [Dutch, 1997]. Si les systèmes de combustion existants sont directs, ils doivent être remplacés par des systèmes de combustion indirects, pour que la combustion puisse s'effectuer sous un flux d'air primaire faible, ce qui entraînera un investissement compris entre 600 000 et 800 000 € pour un four d'une capacité de 3 000 tonnes de clinker/jour [Cembureau, 1997]. En Espagne, la totalité des fours existants utilisent des systèmes indirects d'alimentation en combustible.

Alternative	5.3.2. REFROIDISSEMENT DE LA FLAMME
Action	Action : prévention à la source. Changements technologiques.
Étape du processus	Cuisson du clinker
Problématique environnementale	Production d'émissions de NO _x dans l'atmosphère.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	La réduction des émissions de NO _x peut atteindre 50 %. Cette réduction peut être atteinte dans des conditions optimales, la réduction maximale étant obtenue sur des émissions initiales de 2 000 mg/Nm ³ .
Description	Refroidissement de la température de la flamme grâce à l'ajout d'eau.
Procédure	L'ajout d'eau au combustible, ou directement sur la flamme, réduit la température et augmente la concentration des radicaux hydroxy. Cela peut avoir un effet positif sur la réduction des NO _x dans la zone de combustion. Les résultats sont optimaux s'ils sont atteints lors de l'utilisation de combustibles alternatifs avec une certaine teneur en eau.
Commentaires	<p>Il est nécessaire de prendre en compte une consommation d'eau comprise entre 3 et 20 kg/tonne de clinker, tout en sachant que cette eau ajoutée peut provoquer des problèmes de fonctionnement du four.</p> <p>Il est également nécessaire de prendre en compte une consommation énergétique supplémentaire comprise entre 10 et 65 MJ/tonne de clinker, à cause de la chaleur supplémentaire requise pour provoquer l'évaporation de l'eau ajoutée.</p> <p>Néanmoins, dans ce système de réduction des NO_x, il faut comptabiliser une petite émission supplémentaire de CO₂ d'environ 0,1 - 1,5 %, associée à l'augmentation de la dépense énergétique. Les émissions supplémentaires de CO₂ peuvent être minimisées avec l'utilisation d'eaux résiduaires.</p> <p>Le système d'injection des NO_x, ou l'ajout d'eau dans le combustible, peut être appliqué dans les installations existantes et neuves.</p>
Aspects économiques	<p>Les coûts d'investissement pour un système de refroidissement de la flamme par ajout d'eau sont compris entre 0 et 200 000 €.</p> <p>La durée de vie est supérieure à 5 ans et il est nécessaire de prendre en compte des coûts d'exploitation de 0,03 à 0,52 €/tonne de clinker, en plus d'une pénalisation éventuelle, difficile à estimer, liée à une réduction possible de la capacité de production de clinker (à cause des limitations de la dépense énergétique, qui augmente avec l'injection d'eau) [BREF, 2001].</p>

Alternative	5.3.3. COMBUSTION PAR ÉTAPES.
Action	Action : prévention à la source. Changements technologiques.
Étape du processus	Cuisson du clinker : fours avec préchauffage et/ou précalcination.
Problématique environnementale	Production d'émissions de NO _x dans l'atmosphère.

Bénéfices environnementaux de l'alternative	Certaines cimenteries modernes, avec une bonne optimisation, atteignent des niveaux d'émission inférieurs à 500 mg de NO _x /Nm ³ avec une combustion par étapes.
Description	<p>Cette technique consiste essentiellement à échelonner la combustion sur plusieurs phases, en introduisant le combustible par différents points ; elle est principalement mise en œuvre dans des précalcinateurs spécialement conçus.</p> <p>La première étape de la combustion est réalisée dans le brûleur principal du four. La deuxième étape de la combustion s'effectue avec un brûleur à l'entrée du four, produisant une atmosphère réductrice qui décompose une partie des oxydes d'azote générés dans la zone de frittage.</p>
Procédure	<p>La température élevée dans cette zone est particulièrement favorable à la réaction qui reconvertit les NO_x en azote élémentaire. Lors de la troisième étape de la combustion, le combustible est injecté dans le calcinateur avec une certaine quantité d'air tertiaire, produisant également ici une atmosphère réductrice. Ce système réduit la production des NO_x de combustible et diminue également les NO_x émis par le four.</p> <p>Lors de la quatrième et dernière étape de la combustion, l'air tertiaire restant est injecté dans le système comme « air de finition » pour compléter la combustion. [Dutch, 1997].</p> <p>Le principe de cette technique, décrite précédemment, est le même que celui basé sur la réduction des NO_x observée dans les fours qui utilisent des combustibles non pulvérisés, par exemple des morceaux de pneus, dans la zone centrale du four.</p> <p>Les calcinateurs actuellement employés diffèrent les uns des autres principalement par l'emplacement de l'entrée du combustible, la manière dont le combustible est distribué, l'alimentation du four et de l'air tertiaire, et leur configuration géométrique. [Dutch, 1997].</p>
Commentaires	<p>La technologie de combustion par étapes peut être utilisée uniquement dans les fours équipés d'un précalcinateur. Des modifications substantielles sont nécessaires dans les cimenteries avec des systèmes de préchauffeurs à cyclones sans précalcinateur.</p> <p>Si le processus de combustion ne se termine pas dans le précalcinateur, les émissions de CO et de SO₂ peuvent augmenter [Rapport Cembureau, 1997], des problèmes avec le CO ayant été détectés, ainsi que des engorgements lorsqu'un rendement élevé est recherché [Cembureau, 1997]. Malgré la garantie d'une réduction des émissions de NO_x jusqu'à 50 %, il est très difficile d'atteindre ces valeurs en conservant les niveaux d'émission de CO.</p> <p>Dans les fours à voie humide et dans les fours longs, l'alimentation en combustibles alternatifs peut être effectuée dans une zone appropriée du four, créant une zone réductrice (système breveté « Mid Kiln »). L'ouverture réalisée dans un four rotatif et le système de vannes permettent une alimentation en combustible à chaque rotation du four.</p>
Aspects économiques	<p>Les coûts d'investissement pour l'installation d'une combustion par étapes dans un four avec précalcinateur sont de 0,1 à 2 millions d'euros, en fonction de la conception du calcinateur existant [Cembureau, 1997].</p> <p>Dans un four à 3 000 tonnes/jour avec préchauffeur et précalcinateur, les coûts d'investissement de l'installation du précalcinateur et de la conduite d'air tertiaire sont environ de 1 à 4 millions d'euros. [Cembureau, 1997].</p> <p>Les coûts d'investissement pour transformer un four à 3 000 tonnes/jour avec préchauffeur et refroidisseur planétaire en un four avec précalcinateur et refroidisseur à grille sont de 15 à 20 M€.</p>

Alternative	5.3.4. RÉDUCTION NON CATALYTIQUE SÉLECTIVE (RNCS)
Action	Action : traitement final.
Étape du processus	Cuisson du clinker : fours avec préchauffage et/ou précalcination.
Problématique environnementale	Production d'émissions de NO _x dans l'atmosphère.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	<p>Ce procédé permet d'atteindre une efficacité de la réduction de plus de 50 %.</p> <p>Il existe plusieurs installations RNCS à échelle réelle en fonctionnement ; la plupart d'entre elles ont été conçues et fonctionnent avec des valeurs de réduction de NO_x de 10 à 50 % (avec des rapports molaires NH₃/NO₂ de 0,5 à 0,9) et des niveaux d'émission de 500 à 800 mg de NO_x/Nm³.</p>
Description	<p>La RNCS consiste en l'injection de composés NH₂-X (communément de l'eau ammoniacale avec 25 % de NH₃, également du gaz d'ammoniac, des solutions d'urée, du Nitrocal, des cyanamides, des bio-solides ou d'autres substances similaires) dans les gaz de combustion pour réduire les NO_x en N₂.</p>
Procédure	<p>La réaction (réduction des NO_x en N₂) possède un point optimal dans une plage de températures entre 800 et 1 000 °C, devant fournir un temps suffisant de rétention pour que les agents injectés puissent réagir avec les NO_x.</p> <p>Il est important de maintenir la plage de températures précédemment mentionnée. Si la température chute en dessous de ce niveau, l'ammoniac est émis sans réagir et, à des températures significativement élevées, l'ammoniac s'oxyde en NO_x, ce qui aboutit à ce que les émissions de gaz à éliminer augmentent au lieu de diminuer.</p> <p>L'efficacité de la réduction des NO_x augmente avec le rapport molaire NH₃/NO₂, et la valeur de la réduction des NO_x ne peut être augmentée simplement à volonté, puisqu'un dosage plus élevé est davantage susceptible de provoquer des fuites de NH₃. Ces émissions de NH₃ sans réaction se produisent dans d'autres secteurs industriels, sous forme d'aérosols de chlorures et de sulfates d'ammoniac, qui ne sont pas capturés par les filtres, et qui sont visibles sous la forme d'une colonne blanche au-dessus de la cheminée.</p> <p>En définitive, l'efficacité de la réduction dépend de la température, du temps de séjour, de la concentration en ammoniac et des NO_x présents dans les gaz.</p>
Commentaires	<p>L'accès à la fenêtre de température correcte est facile à obtenir dans les fours avec préchauffeur et dans les fours avec précalcinateur. Néanmoins, il ne se passe pas la même chose dans les fours Lepol et, de fait, il n'existe aucune installation RNCS à échelle industrielle pour ce type de fours. Dans les fours longs à voie sèche et à voie humide, il est impossible d'atteindre la température correcte avec le temps de rétention nécessaire et, par conséquent, cette technique ne s'applique pas à ces fours.</p> <p>Il est nécessaire de signaler que cette technique consiste à limiter les émissions de certains polluants, c'est-à-dire les NO_x, en utilisant un agent réducteur, l'ammoniac, sensiblement plus dangereux dans le cas des émissions dans l'atmosphère que les polluants qu'il s'agit d'éliminer.</p> <p>L'ammoniac qui n'a pas réagi peut s'oxyder et se transformer en NO_x dans l'atmosphère. Les fuites de NH₃ peuvent enrichir en ammoniac la poussière qui est ensuite capturée par l'électrofiltre, empêchant son recyclage dans le broyeur à ciment, générant un déchet qui nécessite un traitement particulier [Cembureau, 1997]. De la chaleur supplémentaire est nécessaire pour évaporer l'eau de la solution ammoniacale, ce qui entraîne une petite augmentation des émissions de dioxyde de carbone.</p>

	<p>De plus, le stockage et la manipulation de l'ammoniac représente un danger potentiel pour l'environnement et le transport, et ce produit nécessite des mesures de sécurité supplémentaires.</p> <p>Tableau 5.3.2. Différents aspects environnementaux associés au composé employé pour la RNCS.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Eau ammoniacale</th> <th>Bio-solides</th> <th>Urée</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Consommation d'eau</td> <td>1,5 kg/tonne de clinker</td> <td>140 kg/tonne de clinker</td> <td>1,5 kg/tonne de clinker</td> </tr> <tr> <td>Consommation d'énergie</td> <td>5 kJ/kg de clinker</td> <td>500 kJ/kg de clinker</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Émission de gaz</td> <td>NH₃, N₂O, CO₂, aérosols, poussière</td> <td>NH₃, N₂O, CO₂, aérosols, poussière</td> <td>NH₃, N₂O, CO₂, aérosols, poussière</td> </tr> </tbody> </table>				Eau ammoniacale	Bio-solides	Urée	Consommation d'eau	1,5 kg/tonne de clinker	140 kg/tonne de clinker	1,5 kg/tonne de clinker	Consommation d'énergie	5 kJ/kg de clinker	500 kJ/kg de clinker	0	Émission de gaz	NH ₃ , N ₂ O, CO ₂ , aérosols, poussière	NH ₃ , N ₂ O, CO ₂ , aérosols, poussière	NH ₃ , N ₂ O, CO ₂ , aérosols, poussière
	Eau ammoniacale	Bio-solides	Urée																
Consommation d'eau	1,5 kg/tonne de clinker	140 kg/tonne de clinker	1,5 kg/tonne de clinker																
Consommation d'énergie	5 kJ/kg de clinker	500 kJ/kg de clinker	0																
Émission de gaz	NH ₃ , N ₂ O, CO ₂ , aérosols, poussière	NH ₃ , N ₂ O, CO ₂ , aérosols, poussière	NH ₃ , N ₂ O, CO ₂ , aérosols, poussière																
Aspects économiques	<p>Le tableau suivant résume les paramètres économiques en fonction du composé utilisé pour la RNCS.</p> <p>Tableau 5.3.3. Résumé des aspects économiques.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Eau ammoniacale</th> <th>Bio-solides</th> <th>Urée</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Durée de vie</td> <td>> 5 ans</td> <td>NC</td> <td>NC</td> </tr> <tr> <td>Investissement</td> <td>0,5 - 1,5 M€</td> <td>0,4 - 0,6 M€</td> <td>0,5 - 1 M€</td> </tr> <tr> <td>Coûts d'exploitation</td> <td>0,3 - 0,5 €/tonne de clinker</td> <td>1,9 - 5,5 €/tonne de clinker</td> <td>1 - 1,5 €/tonne de clinker</td> </tr> </tbody> </table> <p>Pour un four avec préchauffeur à 3 000 tonnes/jour avec une émission initiale de NO_x jusqu'à 2 000 mg/Nm³ et avec une réduction de NO_x jusqu'à 65 % (c'est-à-dire 700 mg de NO_x/Nm³), les coûts d'investissement pour la RNCS utilisant de l'eau ammoniacale comme agent réducteur sont de 0,5 à 1,5 M€.</p> <p>Les coûts dépendent également des réglementations de sécurité sur le stockage de l'eau ammoniacale.</p> <p>Les coûts d'exploitation pour le même four sont de 0,3 à 0,5 €/tonne de clinker. Ils sont, principalement déterminés par le coût de l'ammoniac injecté [Cembureau, 1997].</p>				Eau ammoniacale	Bio-solides	Urée	Durée de vie	> 5 ans	NC	NC	Investissement	0,5 - 1,5 M€	0,4 - 0,6 M€	0,5 - 1 M€	Coûts d'exploitation	0,3 - 0,5 €/tonne de clinker	1,9 - 5,5 €/tonne de clinker	1 - 1,5 €/tonne de clinker
	Eau ammoniacale	Bio-solides	Urée																
Durée de vie	> 5 ans	NC	NC																
Investissement	0,5 - 1,5 M€	0,4 - 0,6 M€	0,5 - 1 M€																
Coûts d'exploitation	0,3 - 0,5 €/tonne de clinker	1,9 - 5,5 €/tonne de clinker	1 - 1,5 €/tonne de clinker																

5.4. ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR LE CONTRÔLE DES ÉMISSIONS DE SO₂

Les meilleures techniques disponibles pour la réduction des émissions de SO₂ combinent les mesures primaires générales précédemment mentionnées avec l'ajout d'absorbant dans les fours à voie sèche (pour des émissions initiales inférieures à 1 200 mg/m³) ou dans les barboteurs à gaz secs ou humides (pour des émissions initiales supérieures à 1 200 mg/m³).

Le tableau suivant présente une comparaison des alternatives technologiques en termes de possibilités d'applications, d'efficacité de la réduction, d'émissions et de coûts.

Tableau 5.4.1. Aperçu général des techniques de contrôle des émissions de SO₂.

Technique	Fours concernés	Efficacité de la réduction (%)	Émissions		Coûts ⁽³⁾	
			(mg/m ³) ⁽¹⁾	Kg/tonne de clinker ⁽²⁾	Investissement	Exploitation
Ajout d'absorbant	Tous	60 - 80 %	400	0,8	0,2 - 0,3	0,1 - 0,4
Barboteur sec	Sec	> 90 %	< 400	< 0,8	11	1,4 - 1,6
Barboteur humide	Tous	> 90 %	< 200	< 0,4	6 - 10	0,5 - 1
Charbon actif	Sec	> 95 %	< 50	< 0,1	15 ⁽⁴⁾	NC

1) En référence à des conditions normales.

2) Kg/tonne de clinker : calculé pour 2 000 m³/tonne de clinker.

3) Les coûts de la recherche sont exprimés en 10⁶ € et d'exploitation en €/tonne de clinker.

4) Ces coûts incluent le procédé RNCS, en référence à un four d'une capacité de 2 000 tonnes de clinker/jour et une émission initiale de 50 - 600 mg de SO₂/m³.

Alternative	5.4.1. RÉDUCTION DE LA TENEUR EN SOUFRE DANS LES MATIÈRES PREMIÈRES ET LE COMBUSTIBLE
Action	Action : prévention à la source de la pollution. Substitution des matières premières.
Étape du processus	Préparation de la matière première et du combustible. Cuisson du clinker : fours avec préchauffage et/ou précalcination et autres.
Problématique environnementale	Production d'émissions de SO ₂ .
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Réduction des émissions de SO ₂ .
Description	Le soufre peut être présent dans le combustible et/ou sous forme volatile ou non volatile dans les matières premières. L'oxydation de celui-ci pendant la cuisson du clinker entraîne la formation de SO ₂ .
Procédure	Remplacement des matières premières ou des combustibles à haute teneur en soufre par d'autres produits plus appropriés au point de vue environnemental.
Commentaires	Le comportement du soufre dans les fours avec préchauffage et les fours secs/humides est significativement différent.

Dans les fours à préchauffage et précalcination, le contenu en soufre du combustible ne génère pratiquement pas d'émissions, à cause du lavage efficace des gaz de combustion du four à contre-courant du cru chaud lors de l'étape de préchauffage et/ou de précalcination. Dans un four à préchauffage, tout le soufre du combustible est transformé en un composé bien défini, comme K_2SO_4 et $Ca_2K_2(SO_4)_3$, ou bien en une solution solide dans les minéraux du clinker, par exemple sous forme de bélite. Par conséquent, le contenu en soufre du combustible ne contribue pas de manière significative à l'augmentation des émissions de SO_2 dans les fours à préchauffage et/ou précalcination.

Néanmoins, le contenu en soufre du combustible peut entraîner un impact significatif des émissions de SO_2 , si d'autres fours sont utilisés. Puisque dans ce cas, le contact entre le cru et les gaz de combustion est moins intense (réduction de l'effet de lavage). Dans ce type de four, une moyenne de 10 à 50 % du soufre contenu dans le combustible est émise sous forme de SO_2 .

Le soufre contenu dans les matières premières sous forme de sulfures (pyrite) ou de soufre organique peut augmenter les émissions de SO_2 dans les fours à préchauffage et précalcination. Une moyenne de 30 - 50 % des sulfures présents dans les matières premières est émise sous forme de SO_2 .

Le contenu en soufre des matières premières sous forme de sulfates ne contribue pas à l'augmentation des émissions de SO_2 dans ce type de fours, mais il subit le même sort que le soufre présent dans le combustible, c'est-à-dire qu'il s'intègre au clinker.

Si d'autres fours sont utilisés, généralement les fours à voie humide, le contenu en soufre des matières premières contribue à l'augmentation des émissions de SO_2 de la même façon que le contenu en soufre des combustibles. Les sulfures s'oxydent en SO_2 et les sulfates se dissocient. Environ 10 à 50 % du soufre contenu dans les matières premières sont émis par le four sous forme de SO_2 .

Par conséquent, une réduction des sulfures contenus dans la matière première peut réduire les émissions de SO_2 dans les fours à préchauffage et/ou précalcinateur. Néanmoins, la réduction du soufre et des sulfates du combustible n'influe pas sur les émissions de SO_2 générées dans ces types de fours.

Dans d'autres types de fours, différents de ceux qui disposent d'un préchauffeur, tout le soufre contribue aux émissions de SO_2 .

Tableau 5.4.2. Émissions de SO_2 dans les fours à ciment.

	Lepol, fours à préchauffage/précalcination	Autres fours
Soufre du combustible	Aucune émission générée	Génération d'émissions
Soufre volatil dans les matières premières	Génération d'émissions	Génération d'émissions
Soufre non volatil dans les matières premières	Aucune émission générée	Génération d'émissions

Aspects économiques	Les aspects économiques relatifs à cette mesure sont ceux associés au coût de substitution de la matière première ou du combustible contenant du soufre par d'autres à faible teneur en soufre [BREF, 2001].
---------------------	--

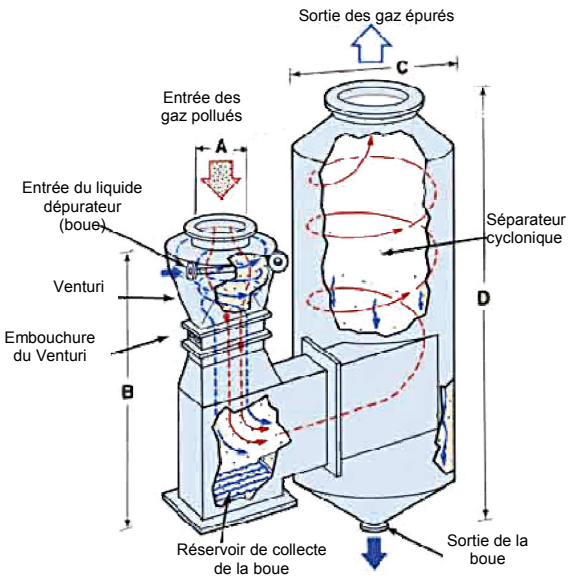
Alternative	5.4.2. AJOUT D'ABSORBEUR
Action	Action : traitement final.
Étape du processus	Cuisson du clinker : four rotatif.
Problématique environnementale	Production d'émissions de SO ₂ dans l'atmosphère.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Il est possible d'atteindre des réductions en dioxyde de soufre de 60 à 80 % par injection d'absorbant dans les fours à préchauffeur en suspension. Cette technique peut s'appliquer aussi bien aux installations existantes qu'aux nouvelles installations.
Description	Cette méthode consiste à ajouter des absorbants, comme la chaux éteinte (Ca(OH) ₂), la chaux vive (CaO) ou des cendres volantes actives avec un contenu élevé en CaO, aux gaz de combustion du four pour absorber une partie du SO ₂ . Le SO ₂ réagira avec la chaux pour former CaSO ₃ et CaSO ₄ , qui entreront dans le four avec les matières premières et qui s'intégreront au clinker.
Procédure	Cette technique est capable d'épurer les flux gazeux avec des concentrations modérées de dioxyde de soufre et peut s'appliquer à des températures de plus de 400 °C. Les valeurs de réduction les plus élevées peuvent être atteintes à des températures qui dépassent les 600 °C. Il est recommandé d'employer un absorbant basé sur de la chaux éteinte, avec une surface particulièrement haute et d'une porosité élevée. La chaux éteinte ne possède pas une réactivité élevée et, par conséquent, elle doit être appliquée avec des rapports molaires Ca(OH) ₂ /SO ₂ élevés, entre 3 et 6. Les flux gazeux avec des concentrations importantes de dioxyde de soufre nécessitent 6 à 7 fois les quantités stœchiométriques d'absorbant, entraînant des coûts d'exploitation élevés.
Commentaires	Dans les cas où les mesures primaires décrites dans la section 5.1. <i>Alternatives technologiques à caractère général</i> ne seraient pas suffisantes, il est possible d'adopter des mesures complémentaires à la fin du processus, si la situation particulière des alentours de la cimenterie justifie les gros investissements qu'il faudrait réaliser pour l'installation et la maintenance de ces dispositifs. L'ajout d'absorbant est, en principe, applicable à tous les fours, bien que cette technique soit essentiellement employée dans les fours à voie sèche avec préchauffeurs en suspension. Pour les fours à préchauffeur, l'injection directe de chaux éteinte dans les gaz de combustion est moins efficace que l'ajout de chaux éteinte dans le cru, à son entrée dans le préchauffeur. La norme dans les fours à clinker gris est que les niveaux initiaux ne dépassent pas les 1 200 mg/m ³ . Dans ce cas, l'ajout d'absorbant réduira les émissions à des niveaux autour de 400 mg/m ³ . Si, en revanche, les niveaux initiaux sont supérieurs à 1 200 mg/m ³ , l'ajout d'absorbants, comme la chaux éteinte, dans les fours ne sera pas économiquement viable.

	<p>L'ajout de chaux dans l'alimentation du four réduit la qualité des granules/nodules et provoque des problèmes de flux dans les fours Lepol.</p> <p>L'ajout d'absorbeur s'utilise dans certaines cimenteries pour garantir que les limites normales ne seront pas dépassées dans des situations ponctuelles. Par conséquent, en général, il ne s'agit pas d'un fonctionnement en continu, mais plutôt lorsque les circonstances l'exigent.</p>
Aspects économiques	<p>Avec une concentration initiale de dioxyde de soufre jusqu'à 3 000 mg/Nm³, une réduction jusqu'à 65 % et un coût de chaux éteinte de 85 €/t, l'investissement dans un four avec préchauffeur de 3 000 tonnes de clinker/jour est d'environ 0,2 à 0,3 M€ et les coûts d'exploitation s'élèvent à 0,1 à 0,4 €/tonne de clinker.</p> <p>La longévité moyenne des équipements dépasse les 5 ans [BREF, 2001].</p>

Alternative	5.4.3. BARBOTEURS À GAZ SECS
Action	Action : traitement final.
Étape du processus	Cuisson du clinker : four rotatif.
Problématique environnementale	Production d'émissions de SO ₂ dans l'atmosphère.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	<p>Il est possible d'atteindre des réductions de dioxyde de soufre supérieures à 90 % en utilisant des barboteurs à gaz secs.</p> <p>Cette technique peut s'appliquer aussi bien aux installations existantes qu'aux nouvelles installations, tant que la concentration des émissions de SO₂ est élevée.</p> <p>Elle permet la réduction non seulement du SO₂, mais également des autres composants présents dans les gaz de combustion.</p>
Description	<p>Les barboteurs à gaz secs sont également dénommés absorbeurs en lit fluidisé (CFBA en anglais pour « circulating fluidized bed absorber ») ; il s'agit d'un réacteur à colonne de type Venturi dans lequel un lit fluidisé est généré, formé d'un mélange de chaux éteinte, de chaux vive (les absorbeurs) et du cru.</p> <p>Le barboteur est situé à la sortie des gaz de combustion, avant leur émission dans l'atmosphère.</p>
Procédure	<p>Le contact intensif entre le gaz et l'absorbeur, le temps de séjour élevé et la faible température d'exploitation, proche du point de condensation, permettent une efficacité élevée de l'absorption du SO₂.</p> <p>Le gaz de décharge du Venturi est chargé en absorbeur, qui est ensuite récupéré par le précipitateur électrostatique.</p> <p>Une partie de l'absorbeur récupéré est recyclé dans le CFBA et l'autre partie est ajoutée à l'entrée du four, où elle s'intègre au clinker.</p>
Commentaires	L'efficacité maximale de la réduction est atteinte lorsque les concentrations en SO ₂ dans les gaz de combustion approchent les 3 000 mg/Nm ³ .
Aspects économiques	Les coûts d'investissement de cette technique s'élèvent à 11 M€/tonne de clinker.

	<p>La durée de vie est supérieure à 9 ans et il faut prendre en compte des coûts d'exploitation d'environ 1,6 €/tonne de clinker.</p> <p>Si l'on inclut la contribution à la réduction du plâtre, nécessaire pour le broyage du ciment à cause de la teneur en soufre supérieure du clinker, les coûts d'exploitation tombent à 1,4 €/tonne de clinker. Cette contribution est sujette à de fortes variations en fonction de la cimenterie concernée [BREF, 2001].</p>
--	--

Alternative	5.4.4. BARBOTEURS À GAZ HUMIDES
Action	Action : traitement final.
Étape / Opération	Cuisson du clinker : four rotatif.
Problématique environnementale	Production d'émissions de SO ₂ dans l'atmosphère.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	<p>Il est possible d'atteindre des réductions du dioxyde de soufre de 75 à 90 %, grâce à l'installation d'un barboteur à gaz humides à la sortie des gaz de combustion, ainsi que la réduction des autres polluants comme HCl, les particules résiduelles, les métaux et certaines émissions comme celles de NH₃.</p> <p>Cette technique peut s'appliquer aussi bien aux installations existantes qu'aux nouvelles installations, tant que la concentration des émissions de SO₂ est élevée.</p> <p>Du plâtre est généré et utilisé pour la production du ciment.</p>
Description	Il s'agit d'une alternative au système précédemment décrit de CFBA.
Procédure	<p>Les gaz de combustion du four passent par un échangeur de chaleur gaz/eau, avant d'entrer dans le barboteur à une température de 115 °C.</p> <p>Dans le barboteur, le SO₂ est absorbé par une boue de 6 à 10 % de charge solide, constituée de 98 % de plâtre déshydraté (CaSO₄*2H₂O) et de 2 % de calcaire (CaCO₃). La boue est pulvérisée à contre-courant des gaz de combustion, puis elle est récupérée dans un réservoir de recyclage situé dans la partie basse du barboteur, où elle s'oxyde au contact de l'air.</p> $\text{CaSO}_3 + 0,5 \text{O}_2 \longrightarrow \text{CaSO}_4$ <p>Une partie de la boue est pompée dans une centrifugeuse, qui sépare le plâtre de l'eau. Le reste est réinjecté dans le barboteur par une canalisation. La boue de calcaire à 30 % d'humidité est injectée dans la canalisation avant les injecteurs d'aérosols, pour remplacer l'absorbeur usé.</p> $\text{CaSO}_3 + \text{SO}_2 \longrightarrow \text{CaSO}_3 + \text{CO}_2$ <p>Les gaz de décharge sortent du barboteur à une température de 70 °C.</p>

	 <p>Figure 5.4.1. Barboteur Venturi de gaz humides.</p>
<p>Commentaires</p>	<p>L'efficacité maximale de la réduction est atteinte lorsque les concentrations en SO₂ dans les gaz de combustion approchent les 3 000 mg/Nm³.</p>
<p>Aspects économiques</p>	<p>La durée de vie d'un barboteur à gaz humides est de 6 ans et ses coûts d'investissement sont compris entre 10 et 14 M€/tonne de clinker.</p> <p>Les coûts d'exploitation de cette technique dans une cimenterie de référence, comprenant le matériel nécessaire, la puissance consommée et les frais de maintenance, sont de 2,7 €/tonne de clinker. Ces coûts peuvent être réduits à 0,3 - 0,8 €/tonne de clinker si les avantages de cette technique sont valorisés, c'est-à-dire grâce à la chaleur produite dans l'échangeur de chaleur et à son éventuelle vente, à 3,5 €/tonne de clinker et grâce au plâtre produit par le procédé qui peut être utilisé dans le broyage du ciment, à 0,18 €/tonne de clinker [BREF, 2001].</p>

Alternative	5.4.5. ABSORPTION PAR CHARBON ACTIF
Action	Action : traitement final.
Étape du processus	Cuisson du clinker : gaz de combustion du four.
Problématique environnementale	Production d'émissions de SO ₂ dans l'atmosphère.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Réduction des émissions de COV, SO ₂ , NH ₃ et métaux lourds (HM). Dans la pratique, une réduction de SO ₂ supérieure à 95 %.
Description	Le système POLVITEC est composé d'un lit de charbon actif.
Procédure	Les gaz de combustion du four dépoussiérés traversent un lit de charbon actif, qui absorbe les composés comme les COV, le SO ₂ et le NH ₃ . Puis les gaz épurés sont émis dans l'atmosphère.

	<p>Le charbon actif usé est régulièrement extrait jusqu'à un silo séparé, puis remplacé par un nouvel absorbeur. Le charbon en provenance du silo alimente le four avec d'autres combustibles. Le SO₂ absorbé est ensuite intégré au clinker.</p> <p>À cause des caractéristiques du charbon actif, seuls les composés organiques de plus de cinq carbones peuvent être absorbés avec une haute efficacité.</p>
Commentaires	Il s'agit d'une technique très chère qui nécessite des financements publics.
Aspects économiques	Cette mesure implique des coûts d'investissement et d'exploitation relativement élevés [BREF, 2001].

5.5. ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR LE CONTRÔLE DES PARTICULES

Les meilleures techniques applicables pour la réduction des émissions de particules combinent les mesures primaires générales décrites précédemment et :

- La réduction des émissions diffuses grâce à l'application des techniques décrites ci-après, section 5.5.1. *Contrôle des sources d'émission diffuses* ;
- La réduction des émissions de particules par les cheminées grâce à l'installation (voir la section 5.5.2. *Contrôle des sources d'émission ponctuelles*) des équipements suivants :
 - Filtres électrostatiques, avec systèmes de mesure du CO qui minimisent le nombre de tirs ;
 - Filtres à manches avec chambres multiples et systèmes de détection de rupture des manches.

5.5.1. Contrôle des sources d'émission diffuses

Les principales sources d'émission diffuses proviennent du stockage et de la manipulation des matières premières, des combustibles et du clinker, ainsi que de la circulation des véhicules dans l'usine.

Grâce à une disposition simple et linéaire de l'usine, les éventuelles sources d'émission sont minimisées, et une maintenance complète et appropriée de l'installation entraîne indirectement la réduction des émissions diffuses, grâce à la diminution des fuites d'air et des points d'écoulement. L'emploi de dispositifs et de systèmes de contrôle automatique participent également à la réduction des émissions diffuses.

Quelques-unes des techniques pour la diminution des émissions diffuses sont les suivantes :

- **Protection contre le vent pour les empilements exposés aux intempéries.** Lorsqu'il existe un stockage des matériaux à l'air libre, il est possible de réduire les émissions diffuses en employant des barrières contre le vent, conçues à cette fin ;
- **Pulvérisation d'eau et de supprimeurs chimiques de poussière.** Lorsque le point d'origine de la poussière est très localisé, il est possible d'installer un système d'injection d'eau pulvérisée. L'humidification des particules de poussière contribue à l'agglomération de celles-ci et à leur tassement. Il existe également une grande variété d'agents chimiques à utiliser pour fournir une efficacité totale à la pulvérisation d'eau ;
- **Revêtement, nettoyage et arrosage des routes.** Les zones utilisées par les camions doivent bénéficier d'un revêtement et d'un nettoyage régulier dans la mesure du possible. L'arrosage des routes réduit les émissions de poussière, notamment par temps sec. L'adoption de bonnes pratiques d'ordre et de nettoyage réduit également les émissions de poussière ;

- **Aspiration fixe et mobile.** Pendant les opérations de maintenance ou en cas de problème des systèmes de transport, il peut se produire des écoulements de matériau. Pour empêcher la formation d'émissions de poussière pendant les opérations de nettoyage, il est possible d'employer des systèmes d'aspiration. Les nouveaux bâtiments peuvent être facilement équipés de systèmes de nettoyage par aspiration fixe, tandis que les bâtiments existants seront plutôt équipés de systèmes de nettoyage mobile, dotés de raccords flexibles ;
- **Ventilation et récupération dans des filtres à manches.** Chaque fois que cela sera possible, les matériaux qui nécessitent une manipulation doivent être transportés par l'intermédiaire de systèmes fermés, maintenus en dépression. L'air d'aspiration de ce système doit être ensuite épuré dans un filtre à manches, avant d'être rejeté dans l'atmosphère ;
- **Stockage fermé avec système de manipulation automatique.** Les silos de clinker et les stockages fermés avec manipulation automatique sont considérés comme la solution la plus efficace pour régler le problème des émissions de poussière générées par les stocks de grande capacité. Ces stockages sont équipés de filtres à manches pour empêcher la formation de poussière pendant les opérations de chargement et déchargement.

5.5.2. Contrôle des sources d'émission ponctuelles

Il existe trois sources ponctuelles principales d'émission de poussière dans les cimenteries. Il s'agit des fours, des refroidisseurs de clinker et des broyeurs de ciment. Dans chacun de ces sous-processus, les gaz de combustion du four ou l'air passent à travers un matériau pulvérulent et, par conséquent, il n'existe aucune possibilité de réduction primaire.

Aujourd'hui, les émissions de ces trois types de foyer sont combattues par l'installation de précipitateurs électrostatiques (PE), de filtres à manches ou de filtres hybrides.

Le tableau 5.5.1 présente de manière générale les données disponibles. Ce tableau est un résumé et doit être lu conjointement avec les points correspondants qui suivent.

Tableau 5.5.1. Aperçu général des techniques de contrôle de la poussière.

Technique	Cas d'application	Émissions	Coûts ⁽²⁾		Effets secondaires
		mg/Nm ³ ⁽¹⁾	Investissement	Exploitation	
Précipitateur électrostatique	Tous les fours	< 50	2,1 - 4,6	0,1 - 0,2	Diminution des métaux
	Refroidisseurs de clinker	< 50	0,8 - 1,2	0,09 - 0,18	
	Broyeur de ciment	< 50	0,8 - 1,2	0,09 - 0,18	
Filtre à manches	Tous les fours	< 50	2,1 - 4,3	0,15 - 0,35	Diminution des métaux
	Refroidisseurs de clinker	< 50	1,0 - 1,4	0,1 - 0,15	
	Broyeur de ciment	< 50	0,3 - 0,5	0,03 - 0,04	

(1) Se réfère normalement à des moyennes journalières, gaz sec, 273 K, 101,3 kPa et 10 % O₂.

(2) Les coûts d'investissement sont exprimés en M€/tonne de clinker et les coûts d'exploitation en €/tonne de clinker pour réduire les émissions jusqu'à <50 mg/Nm³, en référence normalement à un four d'une capacité de 3 000 tonnes de clinker par jour avec une émission initiale jusqu'à 500 g de poussière/Nm³.

(3) Effets secondaires sur les autres émissions.

Source : *Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de fabricación de cemento (2003)*.

Autant les PE que les filtres à manches possèdent des avantages et des inconvénients. Les deux types présentent une efficacité très élevée de dépoussiérage, pendant le fonctionnement normal de l'installation. Certains de ces nouveaux filtres, dimensionnés de manière appropriée et maintenus dans des conditions de fonctionnement optimal, ont permis d'atteindre des valeurs d'émission comprise entre 5 et 20 mg/Nm³.

Néanmoins, dans des conditions spéciales comme une concentration élevée de CO, le démarrage du four, la mise en service ou l'arrêt du broyeur de cru, l'efficacité des PE peut être significativement réduite, sans que l'efficacité des filtres à manches n'en soit affectée. Par conséquent, les filtres à manches présentent une meilleure efficacité globale, s'ils sont bien entretenus et si les manches filtrantes sont régulièrement remplacées.

À cause des températures maximales d'exploitation dans le cas des filtres à manches et de la résistivité électrique de la poussière entrante dans le cas des PE, les gaz de combustion du four doivent être conditionnés par l'injection d'eau dans la tour de conditionnement, ou dans la conduite de sortie des gaz, ou bien ils peuvent être refroidis à l'air dans un échangeur de chaleur ou par dilution dans l'air.

Les filtres à manches présentent l'inconvénient d'avoir à mettre au rebut les manches filtrantes usées, selon les réglementations nationales correspondantes.

Ces dernières années, des filtres hybrides ont été développés, constitués d'une combinaison des deux systèmes. Les gaz passent d'abord par une chambre électrostatique, où un dépoussiérage partiel est réalisé, puis ensuite dans la chambre à manches. Ce système vise à conjuguer les avantages des deux systèmes et compenser leurs inconvénients.

Alternative	5.5.3. PRÉCIPITATEURS ÉLECTROSTATIQUES											
Action	Action : traitement final.											
Étape du processus	Cuisson du clinker : four, refroidisseur de clinker, broyeur de ciment.											
Problématique environnementale	Production de particules dans l'atmosphère.											
Bénéfices environnementaux de l'alternative	<p>Réduction des émissions de particules avec un rendement jusqu'à 99,99 % et possibilité de récupération des réactifs.</p> <p>La consommation d'énergie de la précipitation électrostatique est inférieure à celle des autres systèmes d'épuration de particules à efficacité similaire.</p> <p align="center">Tableau 5.5.2. Réduction de la production de particules avec un PE en fonction du processus.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Bénéfice environnemental</th> <th>Précipitateur électrostatique pour les gaz de combustion du four</th> <th>Précipitateur électrostatique pour les gaz de de décharge du refroidisseur de clinker</th> <th>Précipitateur électrostatique pour les gaz de décharge du broyeur de ciment</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Réduction de la production de particules</td> <td align="center">Jusqu'à 99,99 %</td> <td align="center">Jusqu'à 99,9 %</td> <td align="center">Jusqu'à 99,99 %</td> </tr> </tbody> </table> <p>L'efficacité maximale n'est pas garantie pour des applications dans n'importe quel type de four. L'efficacité la plus élevée est uniquement garantie dans des conditions normales d'exploitation. Pendant l'arrêt et le démarrage, l'efficacité est moindre.</p>				Bénéfice environnemental	Précipitateur électrostatique pour les gaz de combustion du four	Précipitateur électrostatique pour les gaz de de décharge du refroidisseur de clinker	Précipitateur électrostatique pour les gaz de décharge du broyeur de ciment	Réduction de la production de particules	Jusqu'à 99,99 %	Jusqu'à 99,9 %	Jusqu'à 99,99 %
Bénéfice environnemental	Précipitateur électrostatique pour les gaz de combustion du four	Précipitateur électrostatique pour les gaz de de décharge du refroidisseur de clinker	Précipitateur électrostatique pour les gaz de décharge du broyeur de ciment									
Réduction de la production de particules	Jusqu'à 99,99 %	Jusqu'à 99,9 %	Jusqu'à 99,99 %									

<p>Description</p>	<p>Les précipitateurs électrostatiques génèrent un champ électrostatique le long du chemin des particules dans le flux d'air. Les particules se chargent négativement et se déplacent jusqu'aux plaques collectrices chargées positivement. Les plaques collectrices sont régulièrement soumises à des percussions ou des vibrations pour les nettoyer, déchargeant la matière qui tombe dans des trémies collectrices situées au-dessous.</p> <p>Il est important que les cycles de nettoyage du PE soient optimisés pour diminuer les macroparticules réentrantes et limiter ainsi au maximum la visibilité du panache émis. Les PE se caractérisent par leur faculté à fonctionner dans des conditions de hautes températures (jusqu'à environ 400 °C) et d'humidité élevée.</p> <p>Parmi les avantages des précipitateurs électrostatiques, signalons également leur capacité à traiter de grands débits de gaz, avec de petites pertes de charge, de l'ordre de 0,25 à 1,25 mbar.</p> <div data-bbox="619 763 1182 1137" data-label="Image"> </div> <p>Figure 5.5.1. Précipitateur électrostatique.</p>
<p>Procédure</p>	<p>Les facteurs qui affectent l'efficacité de ce type de précipitateurs sont la vitesse du gaz, l'intensité du champ électrique, la vitesse de chargement des microparticules, la concentration en dioxyde de soufre, le contenu en humidité, ainsi que la forme et la surface des électrodes.</p> <p>Le fonctionnement peut être perturbé par les accumulations de matière, qui peuvent former une couche isolante sur les plaques collectrices, réduisant ainsi l'intensité du champ électrique. Ce phénomène peut se produire s'il existe des entrées de chlorures et de soufre dans le four, formant des chlorures et des sulfates métalliques alcalins. Les chlorures métalliques alcalins forment une poussière très fine (0,1 - 1 µm) et possèdent une résistivité particulière élevée (entre 10^{12} et 10^{13} Ωcm), formant des couches isolantes sur les électrodes et rendant difficile l'élimination de la poussière.</p> <p>Dans les installations existantes, où les précipitateurs électrostatiques installés ne respectent pas les normes d'exploitation, il est possible d'appliquer les techniques d'amélioration suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Installation de pales dans le flux des gaz de décharge ; • Amélioration du système électrique ; • Prise en compte de l'utilisation de tours de conditionnement au-dessus du PE, en introduisant de la vapeur d'eau dans le flux de gaz, afin d'améliorer le rendement du précipitateur ; • Prise en compte de l'utilisation d'eau pulvérisée de conditionnement dans la conduite elle-même, afin de contrôler la température ;

	<ul style="list-style-type: none"> • Installation d'un séparateur cyclonique avant le PE, dans le cas où les conditions des gaz de décharge le nécessiteraient, pour augmenter l'efficacité du PE ; • Remplacement du PE par des filtres à manches, lorsque des améliorations substantielles sont requises. 																				
Commentaires	Tableau 5.5.3. Commentaires sur les PE en fonction du processus.																				
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Commentaires</th> <th>Précipitateur électrostatique pour les gaz de combustion du four</th> <th>Précipitateur électrostatique pour les gaz de décharge du refroidisseur de clinker</th> <th>Précipitateur électrostatique pour les gaz de décharge du broyeur de ciment</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Consommation d'eau (kg/tonne de clinker)</td> <td align="center">25 - 75 (1)</td> <td align="center">---</td> <td align="center">---</td> </tr> <tr> <td>Consommation d'énergie électrique (kWh/tonne de clinker)</td> <td align="center">1,5 - 2,0 (2)</td> <td align="center">1,0 - 1,6</td> <td align="center">1,0 - 1,6</td> </tr> <tr> <td>Production de déchets (g_{acier}/tonne de clinker)</td> <td align="center">5 - 20</td> <td align="center">5 - 20</td> <td align="center">5 - 20</td> </tr> <tr> <td>Durée de vie</td> <td align="center">> 30</td> <td align="center">> 10</td> <td align="center">> 10</td> </tr> </tbody> </table>	Commentaires	Précipitateur électrostatique pour les gaz de combustion du four	Précipitateur électrostatique pour les gaz de décharge du refroidisseur de clinker	Précipitateur électrostatique pour les gaz de décharge du broyeur de ciment	Consommation d'eau (kg/tonne de clinker)	25 - 75 (1)	---	---	Consommation d'énergie électrique (kWh/tonne de clinker)	1,5 - 2,0 (2)	1,0 - 1,6	1,0 - 1,6	Production de déchets (g _{acier} /tonne de clinker)	5 - 20	5 - 20	5 - 20	Durée de vie	> 30	> 10	> 10
	Commentaires	Précipitateur électrostatique pour les gaz de combustion du four	Précipitateur électrostatique pour les gaz de décharge du refroidisseur de clinker	Précipitateur électrostatique pour les gaz de décharge du broyeur de ciment																	
	Consommation d'eau (kg/tonne de clinker)	25 - 75 (1)	---	---																	
	Consommation d'énergie électrique (kWh/tonne de clinker)	1,5 - 2,0 (2)	1,0 - 1,6	1,0 - 1,6																	
	Production de déchets (g _{acier} /tonne de clinker)	5 - 20	5 - 20	5 - 20																	
Durée de vie	> 30	> 10	> 10																		
<p>(1) La consommation d'eau dépend de la température à la sortie du préchauffeur, de la durée relative de l'opération directe avec le broyeur de cru éteint et de l'humidité de la matière première.</p> <p>(2) Il existe une consommation d'énergie électrique pour le fonctionnement du PE et du ventilateur du filtre, et de la tour de conditionnement.</p> <p>La maintenance des précipitateurs électrostatiques ne peut pas s'effectuer en ligne, mais elle n'entraîne aucune complication.</p> <p>Un inconvénient des précipitateurs électrostatiques est le risque d'explosion, provenant des combustions incomplètes dans le four. Ce risque est minimisé grâce à l'automatisation du PE, lorsque le contenu en monoxyde de carbone dans le gaz d'entrée du PE atteint un niveau élevé (sous la limite d'explosion). Pour un fonctionnement efficace des précipitateurs électrostatiques, il est important d'éviter les tirs de CO.</p>																					

Aspects économiques

Tableau 5.5.4. Aspects économiques des PE en fonction du processus.

Commentaires	Précipitateur électrostatique pour les gaz de combustion du four	Précipitateur électrostatique pour les gaz de décharge du refroidisseur de clinker	Précipitateur électrostatique pour les gaz de décharge du broyeur de ciment
Coûts d'investissement (M€)	1,5 - 3,8 (0,6 - 0,8)	0,8 - 1,2	0,8 - 1,2
Coûts d'exploitation (€/tonne de clinker)	0,1 - 0,2	0,09 - 0,18	0,09 - 0,18

Les coûts d'investissement d'un nouveau PE pour un four d'une capacité de 3 000 tonnes de clinker/jour, avec une charge initiale en particules jusqu'à 500 g/m^3 et une teneur en poussière dans le gaz épuré $< 50 \text{ mg/Nm}^3$, sont d'environ 1,5 à 3,8 millions d'euros, avec un supplément de 0,6 à 0,8 million d'euros pour la tour de conditionnement et le ventilateur du filtre, si nécessaire. Les coûts d'exploitation associés sont d'environ 0,1 à 0,2 M€/tonne de clinker.

Pour un refroidisseur de clinker d'un four d'une capacité de 3 000 tonnes de clinker/jour, avec une charge initiale en particules jusqu'à 20 g/m^3 et un contenu en poussière dans le gaz épuré $< 50 \text{ mg/Nm}^3$ et un broyeur à boulets de ciment avec une capacité de 160 tonnes de ciment/heure, un niveau initial jusqu'à 300 g/m^3 et une teneur en poussière dans le gaz épuré $< 50 \text{ mg/Nm}^3$, les coûts d'investissement approchent 0,8 à 1,2 million d'euros et les coûts d'exploitation 0,09 à 0,18 €/tonne de clinker [Cembureau, 1997].

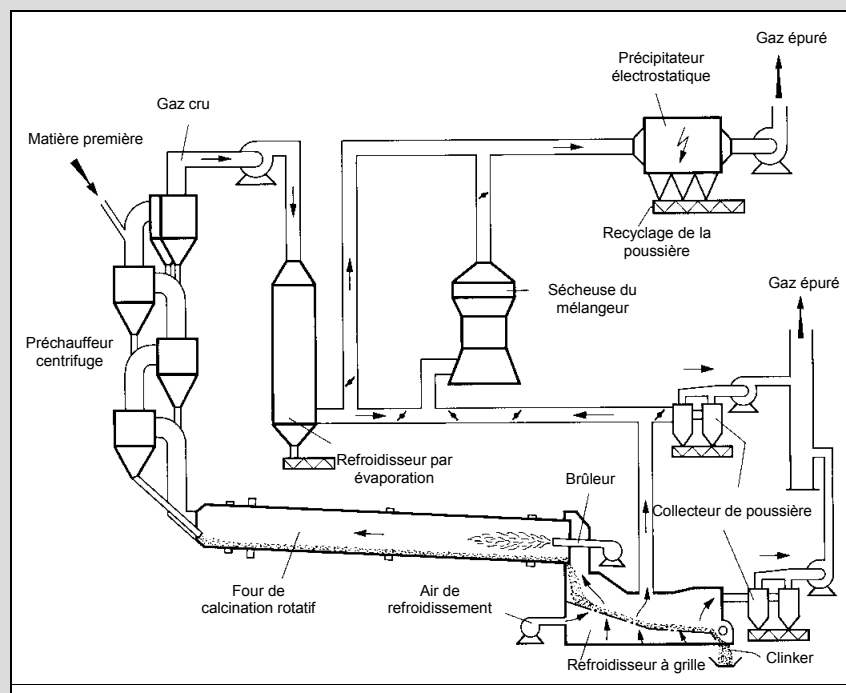


Figure 5.5.2. Processus de fabrication du ciment avec four rotatif, préchauffeur centrifuge, précipitateur électrostatique et collecteur de poussière.

Alternative	5.5.4. FILTRES À MANCHES
Action	Action : traitement final.
Étape du processus	Cuisson du clinker : four, refroidisseur de clinker, broyeur de ciment.
Problématique environnementale	Production de particules dans l'atmosphère.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	La réduction des émissions de particules dans l'atmosphère atteint les 99,99 %.
Description	Le principe de base des filtres à manches consiste à utiliser une membrane en tissu, perméable au gaz, mais qui retient la poussière.
Procédure	<p>Les conceptions actuelles des filtres à manches dépendent de la méthode de nettoyage utilisée : les méthodes de nettoyage les plus communes comprennent le flux de gaz inverse, l'agitation mécanique, la vibration et la pression à l'air comprimé.</p> <p>Le filtre nettoyeur avec vibreur est la forme la plus primitive des filtres à manches. Les extrémités inférieures ouvertes des manches sont fixées, au niveau des ouvertures, sur la plaque des tubes qui sépare la chambre inférieure d'entrée du gaz pollué de la chambre supérieure du gaz épuré. Les supports de manches, auxquels elles sont suspendues, sont raccordés à un mécanisme vibratoire. Le gaz pollué est propulsé vers le haut à l'intérieur des manches du filtre et la poussière est collectée sur les surfaces internes des manches.</p> <p>Puisque le tourteau de poussière augmente en épaisseur, la résistance au flux de gaz augmente et, par conséquent, il est nécessaire de nettoyer régulièrement le milieu filtrant pour contrôler la chute de pression du gaz le long du filtre.</p> <p>Le filtre à manches peut contenir plusieurs compartiments, qui sont isolés individuellement en cas d'une rupture de manche (figure 5.5.3). Cela augmente le coût et la taille du filtre, mais cela permet d'effectuer une maintenance en ligne. Les dimensions du filtre doivent être suffisantes pour permettre le fonctionnement correct du filtre, dans le cas où un compartiment serait hors d'usage. L'installation de « détecteurs de rupture de manche » dans chaque compartiment permet de déterminer les besoins en maintenance.</p>

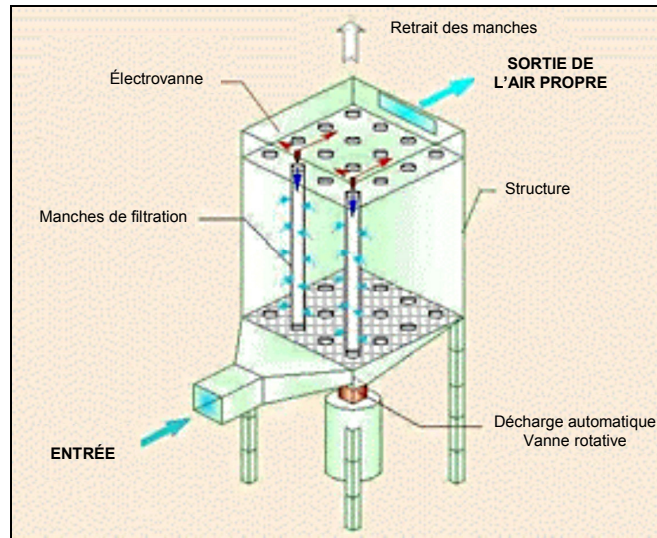


Figure 5.5.3. Schéma de fonctionnement d'un filtre à manches.

Selon la méthode de nettoyage utilisée (continue ou discontinue), il existe deux types de filtres à manches : à air inverse et par secousse.

La méthode par secousse est utilisée lorsqu'il est possible d'interrompre le service du filtre pendant un court laps de temps. Par conséquent, cette méthode exige un fonctionnement discontinu, avec un cycle de filtration et un cycle de nettoyage. Le type de filtre le moins cher et le plus simple est composé d'un certain nombre de manches réunies à l'intérieur d'un châssis. Il fonctionne à une vitesse d'environ 0,01 m/s par manche filtrante. Le nettoyage peut être réalisé manuellement par petites unités. Il existe également une version plus compliquée et robuste, qui inclut un mécanisme automatique de secousse pour le nettoyage des manches, pouvant fonctionner avec des méthodes mécaniques, vibratoires ou de pression. Les manches sont fixées sur un support mécanique, raccordé à un système capable de produire des secousses ou des vibrations grâce à un moteur électrique. Si le tissu utilisé est plus épais, il est possible d'employer des vitesses frontales plus élevées, jusqu'à 0,02 m/s, pour permettre un fonctionnement dans des conditions plus sévères que celles du cas précédent.

En ce qui concerne la méthode de l'air inverse, il existe de nombreux dispositifs différents, mais le mécanisme habituel de nettoyage consiste à introduire, à contre-courant et pendant une brève période, un jet d'air à haute pression grâce à une tuyère raccordée à un réseau d'air comprimé. La vitesse frontale atteint environ 0,05 m/s et il est possible de traiter de hautes concentrations de poussière avec une efficacité élevée. Grâce à ce type de filtre, il est possible de traiter des mélanges à séparation difficile dans une unité compacte et économique. Ce mécanisme de nettoyage est également appelé filtre aéropulsé ou « jet pulse filter » et il est plus efficace que le filtre précédent.

La méthode qui combine les deux techniques précédentes, par secousse et air inverse, est utilisée pour obtenir un fonctionnement en continu. Pour ce faire, les éléments filtrants doivent être répartis dans deux chambres indépendantes ou plus, chacune d'entre elles disposant de son propre système de secousse et d'une entrée d'air propre. L'air entre dans les manches en sens contraire, propulsé par un ventilateur qui renforce le flux, de l'extérieur vers l'intérieur, ce qui favorise le décollement du tourteau.

<p>Commentaires</p>	<p>L'emploi de filtres à manches avec des gaz à hautes températures exige le montage de tissus plus résistants que ceux qui sont normalement fournis, et entraîne par conséquent un coût plus important.</p> <p>Le principal avantage des filtres à manches est leur efficacité toujours élevée, y compris si les paramètres du processus changent (par exemple avec l'arrêt ou le démarrage du four, du refroidisseur de clinker ou du broyeur de ciment, etc.).</p> <p>L'un des principaux inconvénients des filtres à manches est la chute élevée de pression (8 - 20 mbar) qui se produit dans le filtre, entraînant une consommation d'énergie plus importante du ventilateur.</p> <p>Néanmoins, les filtres à manches sont les plus appropriés pour l'industrie du ciment à cause de leur simplicité, leur fiabilité, leurs meilleurs rapports d'élimination que les PE et leur compétitivité économique. De plus, ces filtres peuvent éliminer certains polluants susceptibles d'être émis par absorption dans les tourteaux du collecteur de poussière, à la surface de la manche.</p>															
<p>Aspects économiques</p>	<p>Tableau 5.5.5. Aspects économiques des filtres à manches en fonction du processus.</p> <table border="1" data-bbox="509 779 1444 1339"> <thead> <tr> <th data-bbox="509 779 759 1077">Commentaires</th> <th data-bbox="759 779 975 1077">Filtre à manches pour les gaz de combustion du four</th> <th data-bbox="975 779 1206 1077">Filtre à manches pour les gaz de décharge du refroidisseur de clinker avec système de nettoyage par pression d'air</th> <th data-bbox="1206 779 1444 1077">Filtre à manches pour les gaz de décharge du broyeur de ciment avec système de nettoyage par pression d'air</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="509 1077 759 1193">Coûts d'investissement (M€)</td> <td data-bbox="759 1077 975 1193">0,15 - 0,35 (0,6 - 0,8)</td> <td data-bbox="975 1077 1206 1193">1,0 - 1,4</td> <td data-bbox="1206 1077 1444 1193">0,3 - 0,5</td> </tr> <tr> <td data-bbox="509 1193 759 1339">Coûts d'exploitation (€/tonne de clinker)</td> <td data-bbox="759 1193 975 1339">0,5 - 0,9</td> <td data-bbox="975 1193 1206 1339">0,10 - 0,15</td> <td data-bbox="1206 1193 1444 1339">0,03 - 0,04</td> </tr> </tbody> </table> <p>Les coûts d'investissement d'un nouveau filtre à manches pour un four d'une capacité de 3 000 tonnes de clinker/jour, avec un niveau d'émission initiale jusqu'à 500 g/m³ et une teneur en poussière dans le gaz épuré < 50 mg/Nm³, sont d'environ 1,5 à 3,5 M€, avec un supplément de 0,6 à 0,8 M€ pour la tour de conditionnement et le ventilateur du filtre. Les tours de conditionnement sont nécessaires uniquement pour les applications à basses températures avec des manches par exemple en polyacrylnitrile. Les coûts d'exploitation pour le même filtre à manches sont d'environ 0,5 à 0,9 €/tonne de clinker.</p> <p>Les coûts d'investissement d'un filtre à manches avec système de nettoyage par pression d'air dans un refroidisseur à grille de clinker pour un four d'une capacité de 3 000 tonnes/jour, avec un niveau initial d'émission jusqu'à 20 g/m³ et une teneur en poussière dans le gaz épuré < 50 mg/Nm³ sont d'environ 1,0 à 1,4 M€ (échangeur de chaleur par air et ventilateur du filtre compris) et les coûts d'exploitation sont proches de 0,10 à 0,15 €/tonne de clinker.</p> <p>Pour un broyeur de ciment à boulets avec une capacité de 160 tonnes de ciment/heure, avec des niveaux initiaux d'émission jusqu'à 300 g/m³ et une teneur en poussière dans le gaz épuré < 50 mg/Nm³, les coûts d'investissement d'un filtre à manches avec système de nettoyage par pression d'air sont d'environ 0,3 à 0,5 M€, ventilateur du filtre compris, et les coûts d'exploitation de 0,03 à 0,04 €/tonne de clinker [BREF, 2001].</p>				Commentaires	Filtre à manches pour les gaz de combustion du four	Filtre à manches pour les gaz de décharge du refroidisseur de clinker avec système de nettoyage par pression d'air	Filtre à manches pour les gaz de décharge du broyeur de ciment avec système de nettoyage par pression d'air	Coûts d'investissement (M€)	0,15 - 0,35 (0,6 - 0,8)	1,0 - 1,4	0,3 - 0,5	Coûts d'exploitation (€/tonne de clinker)	0,5 - 0,9	0,10 - 0,15	0,03 - 0,04
Commentaires	Filtre à manches pour les gaz de combustion du four	Filtre à manches pour les gaz de décharge du refroidisseur de clinker avec système de nettoyage par pression d'air	Filtre à manches pour les gaz de décharge du broyeur de ciment avec système de nettoyage par pression d'air													
Coûts d'investissement (M€)	0,15 - 0,35 (0,6 - 0,8)	1,0 - 1,4	0,3 - 0,5													
Coûts d'exploitation (€/tonne de clinker)	0,5 - 0,9	0,10 - 0,15	0,03 - 0,04													

Alternative	5.5.5. FILTRES HYBRIDES
Action	Action : traitement final.
Étape du processus	Cuisson du clinker.
Problématique environnementale	Production de particules dans l'atmosphère.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Réduction des émissions de particules de 99,99 %.
Description	<p>Les filtres hybrides (Advanced Hybrid Filter) sont constitués d'un système de contrôle de la pollution qui élimine les particules microscopiques des gaz de décharge des usines de charbon, des incinérateurs et des cimenteries. Ils sont formés d'un précipitateur électrostatique et d'un filtre à manches.</p> <p>Cette technologie est actuellement implantée dans différentes cimenteries, notamment celle de Gádor (Almería) où fut installé le premier filtre hybride en Espagne.</p>
Procédure	<p>Ces dispositifs bénéficient des avantages des deux moyens traditionnels d'épuration de particules qui existent dans les cimenteries : en premier lieu, ils disposent d'un champ électrostatique dont l'efficacité de capture se situe autour de 90 % (capture par précipitation électrostatique et par sédimentation), puis d'un ensemble de manches qui traite un flux de gaz plus épuré que celui d'un filtre à manches traditionnel.</p> <div data-bbox="451 1104 1342 1543" data-label="Diagram"> <p>Le diagramme illustre le processus de filtration en deux étapes. À l'entrée, les gaz (Gaz) passent à travers un champ électrostatique qui sépare 90% de la poussière. Ensuite, les gaz passent à travers un champ de manches qui sépare uniquement 10% de la poussière. La synergie par ionisation est également indiquée.</p> </div> <p>Source : <i>Cemento y Hormigón</i>, mai 2005.</p> <p>Figure 5.5.4. Schéma de fonctionnement d'un filtre hybride.</p> <p>Dans des situations où un électrofiltre classique est débranché, à cause de la présence de CO, ou s'il fonctionne de manière dégradée, comme dans le cas des périodes de transition qui se produisent pendant les changements de vitesse, le filtre hybride continue à épurer efficacement les gaz grâce au rôle exercé par les manches.</p> <p>En effet, les manches sont soumises à des sollicitations mécaniques très inférieures à celles d'un filtre à manches conventionnel, puisque la charge en poussière est plus faible et que le nombre de nettoyages est, de ce fait, moins important. En conséquence, la durée de vie des manches est prolongée, la consommation de l'air de nettoyage est réduite, ainsi que la perte de charge du filtre, ce qui permet d'économiser de l'énergie.</p>

<p>Commentaires</p>	<p>Selon les recherches, il existe un avantage supplémentaire important, du fait que les particules de poussière les plus fines qui, pendant le fonctionnement normal, s'échappent de la partie électrostatique pour arriver jusqu'aux manches, restent ionisées à cause du champ électrique et ont une certaine tendance à se repousser les unes les autres. Cet effet facilite l'élimination de la poussière à la surface des manches, qui peut être réalisée avec un flux d'air à basse pression, ce qui aide ainsi à diminuer l'effort mécanique subi par le milieu filtrant et qui rallonge sa durée de vie. Selon ces mêmes informations, l'effet électrostatique résiduel est de courte durée et serait perdu si, par exemple, il y avait filtre à manches conventionnel placé en série après un filtre électrostatique existant.</p> <p>Le tableau 5.5.6 suivant présente les avantages d'installer cette technologie par rapport à d'autres alternatives de substitution dans une cimenterie qui souhaiterait changer le précipitateur électrostatique existant.</p> <p align="center">Tableau 5.5.6. Évaluation des différentes alternatives de substitution.</p> <table border="1" data-bbox="507 743 1437 1182"> <thead> <tr> <th></th> <th>Filtre hybride</th> <th>Transformation du PE en filtre à manches</th> <th>Optimisation du PE</th> <th>Nouveau filtre à manches</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Émissions</td> <td>√√</td> <td>√</td> <td>X</td> <td>√</td> </tr> <tr> <td>Durée de l'arrêt</td> <td>14 jours</td> <td>19 jours</td> <td>3 jours</td> <td>5 jours</td> </tr> <tr> <td>Espace disponible</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>√</td> <td>X</td> </tr> <tr> <td>Consommation énergétique</td> <td>√</td> <td>X</td> <td>√√</td> <td>X</td> </tr> </tbody> </table>		Filtre hybride	Transformation du PE en filtre à manches	Optimisation du PE	Nouveau filtre à manches	Émissions	√√	√	X	√	Durée de l'arrêt	14 jours	19 jours	3 jours	5 jours	Espace disponible	√	√	√	X	Consommation énergétique	√	X	√√	X
	Filtre hybride	Transformation du PE en filtre à manches	Optimisation du PE	Nouveau filtre à manches																						
Émissions	√√	√	X	√																						
Durée de l'arrêt	14 jours	19 jours	3 jours	5 jours																						
Espace disponible	√	√	√	X																						
Consommation énergétique	√	X	√√	X																						
<p>Aspects économiques</p>	<p>Les coûts d'investissement pour l'implantation d'un filtre hybride dans une cimenterie qui dispose actuellement d'un précipitateur électrostatique sont inférieurs à ceux d'une transformation en un filtre à manches, à ceux d'un remplacement par un filtre à manches neuf, et pratiquement égaux à ceux d'une optimisation du PE [Cemento y Hormigón, 2005].</p>																									

5.6. ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR LE CONTRÔLE DES COV ET DES PCDD/PCDF

La source principale d'émissions de COV (composés organiques volatils), provenant des fours à ciment, est la matière organique présente dans la matière première. Une partie de cette matière organique est extraite lors de l'exposition aux hautes températures du four. Dans ces conditions, certains composés organiques s'oxydent (brûlent) mais d'autres quittent le four sous la forme d'émissions. Plus le contenu en matière organique dans la matière primaire est faible et plus les températures du four sont élevées, moins d'émissions de COV se produiront.

Le fonctionnement de l'extraction de la matière organique présente dans la matière première dépend, entre autres, du type de four. Ainsi, par exemple, la concentration en oxygène dans les gaz de combustion des fours avec préchauffage a peu d'influence sur les émissions de COV, alors que la concentration en oxygène dans les fours longs à voie sèche et humide représente un potentiel élevé de réduction des COV.

Avec une augmentation de la concentration en oxygène, les émissions de COV dans les fours humides sont moindres, pour la même matière première, par rapport aux fours avec préchauffage.

Cela est dû aux différences importantes de température entre le cru et les gaz de combustion dans les fours longs secs et humides, par rapport aux fours avec préchauffeurs.

La combustion dans la zone d'ignition produit des températures de flamme supérieures à 2 000 °C. Par conséquent, tous les composés organiques qui sont injectés dans le brûleur principal sont complètement oxydés (brûlés) et ne contribuent pas aux émissions de COV. Alors que lors de la deuxième étape de cuisson, comme dans le précalcinateur, il se produit des températures de flamme de l'ordre de 900 - 1 000 °C et, par conséquent, il est nécessaire de prêter une attention spéciale à la sélection, à la préparation et à l'injection des combustibles.

Les émissions de COV dans les fours à ciment sont généralement comprises entre 10 et 100 mg/Nm³, mais en fonction des caractéristiques des matières premières, elles peuvent atteindre jusqu'à 500 mg/Nm³.

Un autre aspect à prendre en compte est l'émission de CO qui, normalement, est élevée lorsque le contenu en matière organique présent dans la matière première est important. Les COV extraits de la matière première peuvent être oxydés en CO₂ ou CO. Notamment dans les zones où le contenu en O₂ est pauvre, ou les températures ne sont pas élevées, il se produit des oxydations incomplètes des COV, générant ainsi du CO.

Pour réduire les émissions de COV dans les pyroprocessus, jusqu'à un certain niveau contrôlé, il existe essentiellement trois mesures :

- Maintien du procédé existant en réduisant la quantité de matière organique dans le système ;
- Modification du procédé existant (mesures de prévention à la source ou mesures de réduction) ;
- Maintien du procédé existant en y ajoutant une unité d'épuration des gaz de combustion (mesures de réduction secondaires, traitement final).

Un autre aspect à prendre en compte est la formation des composés organiques persistants, les dioxines et les furannes (PCDD et PCDF) dans les processus de combustion. Le refroidissement rapide des gaz de combustion du four à une température inférieure à 200 °C est considéré comme la meilleure mesure pour éviter la formation de ces molécules, ainsi qu'une sélection soignée et le contrôle des matières premières qui entrent dans le four.

Les mesures primaires semblent être suffisantes pour respecter le niveau d'émission de 0,1 ng EQT/Nm³ dans des conditions normales de fonctionnement.

Certaines mesures pour réduire les émissions de COV, avec une efficacité de 0 à 95 %, sont décrites ci-dessous. Ces mesures nécessitent certaines conditions préalables à leur application. Dans certains cas, il est possible d'ajuster le système de four existant pour permettre l'application des mesures de réduction. Néanmoins, cela pose des problèmes supplémentaires de coûts d'investissement.

L'application de ces mesures reste limitée aux cas particuliers et elle est généralement associée à des coûts d'investissement et d'exploitation élevés. Il n'existe aucune possibilité d'appliquer des mesures de prévention à la source des émissions de COV sans des coûts d'investissement et d'exploitation très élevés.

L'unique technique de réduction secondaire (traitement final) possible est l'absorption par charbon actif (voir la fiche 5.6.4), qui permet de réduire les émissions de composés organiques avec plus de six carbones C₆. Les composés plus petits ou égaux à C₅ ne sont pas éliminés de manière efficace. Il est nécessaire de mentionner, cependant, que plus de 80 % des émissions de COV dans le four à ciment sont constituées de composés égaux ou inférieurs à C₅.

Alternative	5.6.1. SÉLECTION DES MATIÈRES PREMIÈRES ET DES COMBUSTIBLES
Action	Action : prévention à la source de la pollution. Substitution des matières premières.
Étape du processus	Préparation de la matière première et du combustible.
Problématique environnementale	Production d'émissions de composés organiques volatils (COV).
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Réduction des émissions de COV.
Description	En fonction de l'histoire géologique de la roche utilisée comme matière première, elle possédera un certain contenu en matière organique. Une partie de cette matière organique est extraite après son introduction dans le four. Certains des composés organiques sont oxydés, d'autres quittent le four sous la forme d'émissions. Ainsi, plus le contenu en matière organique dans la matière première est faible et plus la température d'élimination des composés organiques est élevée, plus la production d'émissions organiques en provenance du four sera faible.
Procédure	Remplacement des matières premières ou des combustibles à haute teneur en matières organiques par d'autres matières premières plus appropriés d'un point de vue environnemental.
Commentaires	Il n'est pas possible de réduire la teneur en matière organique dans les matières premières naturelles.
Aspects économiques	Les aspects économiques relatifs à cette mesure sont ceux associés au coût de substitution de la matière première ou du combustible, à haute teneur en matière organique.

Alternative	5.6.2. AJOUT DE LA MATIÈRE PREMIÈRE DANS LA ZONE CHAUDE DU FOUR
Action	Action : prévention à la source de la pollution. Modification du processus.
Étape du processus	Cuisson du clinker : four.
Problématique environnementale	Production d'émissions de composés organiques volatils (COV).
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Réduction des émissions de COV jusqu'à 95 %.
Description	Ajout de la matière première contenant de la matière organique dans la zone chaude du four.
Procédure	Si un composant de la matière première provoque des émissions de COV élevées, il est ajouté directement dans la zone chaude du four, de manière à ce que ses composés organiques soient brûlés avant qu'ils puissent sortir dans l'atmosphère.

<p>Commentaires</p>	<p>Si la partie principale de la matière première est responsable des émissions de COV, il est possible d'ajouter tout le matériau dans un calcinateur flash, où l'augmentation de la température détruira pratiquement toute la matière organique. L'installation de ce calcinateur avec tous les équipements supplémentaires requis nécessitera un investissement plus important. De plus, la consommation en énergie dans un four avec calcinateur flash est significativement plus importante que celle d'un four avec préchauffeur.</p> <p>Les inconvénients de cet ajout sont : une consommation d'énergie élevée dans le four, la nécessité d'éventuels travaux supplémentaires au niveau du point d'injection et une alimentation du four moins homogène, ce qui entraîne une baisse de la qualité du clinker.</p> <p>La plage de consommation d'énergie thermique, à la suite de l'application de cette mesure, est comprise entre 0 et 3 300 KJ/tonne de clinker. Elle est pratiquement nulle si de petites portions de matière première sont directement ajoutées dans la zone chaude du four.</p> <p>Cette mesure est applicable uniquement pour les composants qui représentent une très faible partie de la matière première.</p>
<p>Aspects économiques</p>	<p>Les coûts d'investissement de cette technique sont supérieurs à 25 M€, en tenant compte que, si seulement une petite portion de la matière première est ajoutée dans la zone chaude, les coûts sont beaucoup moins importants et que, si toute la matière première doit passer par un calcinateur flash, les coûts sont beaucoup plus importants. Les coûts d'exploitation sont supérieurs à 8,9 €/tonne de clinker [BREF, 2001].</p>

Alternative	5.6.3. ABSORPTION PAR CHARBON ACTIF
Action	Action : traitement final. Solution secondaire uniquement si, avec des techniques primaires, le taux de 0,1 ng/m ³ est dépassé.
Étape du processus	Cuisson du clinker. Gaz de combustion du four.
Problématique environnementale	Production d'émissions de composés organiques volatils (COV) et de PCDD/PCDF.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Réduction des émissions de COV, SO ₂ , NH ₃ , métaux lourds (HM), PCDD et PCDF.
Description	Le système POLVITEC est composé d'un lit de charbon actif.
Procédure	<p>Les gaz de combustion du four dépoussiérés traversent un lit de charbon actif, qui absorbe les composés comme les COV, le SO₂ et le NH₃. Puis les gaz épurés sont émis dans l'atmosphère.</p> <p>Le charbon actif usé est régulièrement extrait jusqu'à un silo séparé, puis remplacé par un nouvel absorbeur. Le silo de charbon sert ensuite à alimenter le four avec les autres combustibles, où les COV absorbés sont brûlés. À cause des caractéristiques du charbon actif, seuls les composés organiques de plus de cinq carbones peuvent être absorbés avec une haute efficacité.</p>
Commentaires	Il s'agit d'une technique très coûteuse qui nécessite des financements publics.
Aspects économiques	Cette mesure implique des coûts d'investissement et d'exploitation relativement élevés [BREF, 2001].

5.7. ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR LE CONTRÔLE DES ÉMISSIONS DE MÉTAUX

Les métaux plus lourds que le titane (4,51 g/cm³) sont considérés comme des métaux lourds (HM). Tous les métaux lourds ne sont pas toxiques et toutes les toxicités des métaux ne sont pas équivalentes. Néanmoins, dans certains pays, les métaux lourds se différencient selon leur toxicité :

- Classe I : Cd, Hg, Ti;
- Classe II : As, Co, Ni, Se, Te ;
- Classe III : Pb, Cr, Cu, Pt, V, Sn, Pd, Sb, Mn, Rh.

Les métaux de classe I sont les plus toxiques et les métaux de classe III sont les moins toxiques.

Les principales sources d'émission de métaux lourds, provenant de la cheminée des fours à ciment, sont les contenus en métaux lourds des matières premières et des combustibles. En fonction de leur comportement dans le système de four, les métaux se classent en trois types :

- Métaux lourds non volatils ou avec une volatilité faible (As, Be, Co, Cr, Cu, Mn, Sb, Se, Te, V, Zn) : ils s'intègrent au clinker à presque 100 % et n'apparaissent pratiquement pas dans les émissions ;
- Métaux lourds semi-volatils (comme Ti, Pb et Cd) : ils ne s'intègrent pas complètement au clinker. La partie restante, non intégrée dans le clinker, est pratiquement complètement absorbée à la surface des particules de poussière, dans le système des gaz de combustion du four. Les filtres, comme les précipitateurs électrostatiques et les filtres à manches, peuvent éliminer efficacement les métaux semi-volatils. La poussière collectée par le filtre est normalement recyclée dans le four, ce qui provoque une accumulation interne des métaux lourds dans le système de four. Pour empêcher cela, une portion de la poussière collectée par le filtre est envoyée dans le broyeur de ciment ;
- Métaux lourds volatils : ils ne peuvent pas être efficacement contrôlés par le dépoussiérage des gaz de combustion du four, puisqu'une proportion de ces métaux reste en permanence volatils (ils ne sont pas absorbés à la surface des particules de poussière). L'exemple le plus caractéristique dans l'industrie du ciment est le mercure (Hg). Le mercure est émis en grande proportion sous forme de vapeur et, par conséquent, plus la température des gaz de combustion dans le filtre est faible, plus la proportion de mercure absorbé dans les particules de poussière et pouvant être éliminée par les gaz de combustion est importante.

Pour réduire les émissions de métaux lourds dans les pyroprocessus, il existe essentiellement les trois méthodes suivantes :

- Maintien des procédés existants en réduisant l'entrée des métaux lourds dans le système ;
- Modification des procédés existants (mesures primaires de réduction ou de prévention à la source de la pollution) ;
- Maintien des procédés existants en y ajoutant une unité indépendante d'épuration des gaz de combustion (mesures de réduction secondaires ou traitement final).

Chaque mesure de réduction nécessite des conditions préalables. Les mesures de réduction des émissions de métaux lourds les plus communes sont la réduction des métaux lourds à l'entrée et un dépoussiérage efficace. Pour éviter l'accumulation de métaux lourds dans le système de four, une portion de la poussière du filtre doit être continuellement ou périodiquement extraite du processus. En outre, il existe des mesures de réduction secondaires, comme l'absorption par charbon actif, qui ne sont nécessaires que si le contenu en métaux lourds volatils est très élevé.

Alternative	5.7.1. SÉLECTION DES MATIÈRES PREMIÈRES OU DES COMBUSTIBLES
Action	Action : prévention à la source de la pollution. Substitution des matières premières.
Étape / Opération	Préparation de la matière première et du combustible.
Problématique environnementale	Production d'émissions de métaux lourds (HM).
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Réduction des émissions de métaux lourds (HM).
Description	Les métaux lourds sont présents naturellement dans certaines matières premières de la fabrication du ciment. Les métaux lourds non volatils atteignent l'unité de dépoussiérage intégrés dans les particules de poussière. Les métaux semi-volatils et volatils peuvent atteindre l'équipement de dépoussiérage de la même façon que précédemment, intégrés dans les particules (par exemple Ti), ou sous forme de vapeur (par exemple Hg). Plus le contenu en métaux lourds volatils dans la matière première ou le combustible est important, plus les émissions sont normalement élevées, mais généralement avec un niveau faible.
Procédure	Remplacement des matières premières ou des combustibles à haute teneur en métaux lourds par d'autres matières premières plus appropriés d'un point de vue environnemental.
Commentaires	La réduction des métaux lourds semi-volatils et volatils des matières premières naturelles ou des combustibles est virtuellement impossible. Il est nécessaire d'éviter l'utilisation de déchets, comme matières premières ou combustibles alternatifs, si ceux-ci ont une teneur excessive en métaux lourds.
Aspects économiques	Les aspects économiques relatifs à cette mesure sont ceux associés au coût de substitution de la matière première ou du combustible à haute teneur en métaux lourds.

Alternative	5.7.2. ABSORPTION PAR CHARBON ACTIF
Action	Action : traitement final. Solution secondaire uniquement si, avec des techniques primaires, le taux de 0,1 ng/m ³ est dépassé.
Étape du processus	Cuisson du clinker. Gaz de combustion du four.
Problématique environnementale	Production d'émissions de métaux lourds (HM).
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Réduction des émissions de métaux lourds (HM), COV, SO ₂ et NH ₃ .
Description	Le système POLVITEC est composé d'un lit de charbon actif.

Procédure	<p>Les gaz de combustion du four dépoussiérés traversent un lit de charbon actif, qui absorbe les composés comme les métaux lourds, les COV, le SO₂ et le NH₃. Puis les gaz épurés sont émis dans l'atmosphère.</p> <p>Le charbon actif usé est régulièrement extrait jusqu'à un silo séparé, puis remplacé par un nouvel absorbeur. Le silo de charbon sert ensuite à alimenter le four avec les autres combustibles, où les métaux lourds absorbés restent intégrés au clinker ou, au contraire, sont émis par le système de four. Dans le cas d'une accumulation de métaux lourds, ils doivent être éliminés du système par une petite extraction de la poussière collectée dans le filtre du four et par leur incorporation dans les broyeurs de ciment.</p>
Commentaires	L'absorption par charbon actif est une mesure très coûteuse, qui reste applicable uniquement grâce à des financements publics.
Aspects économiques	Cette technique implique des coûts d'investissement et d'exploitation relativement élevés [BREF, 2001].

5.8. ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR LA RÉDUCTION DU CO₂

Comme expliqué dans la section 5.1.1.4 *Cuisson du clinker*, les émissions de CO₂ dépendent du rendement énergétique du processus, du combustible utilisé et du rapport clinker/ciment, sauf si un traitement final de capture du CO₂ est effectué, traitement qui est en phase de développement.

Ainsi, par conséquent, la réduction des émissions de CO₂ présente les alternatives suivantes pour sa prévention à la source :

- Amélioration du rendement énergétique du processus. Voir la section 5.1 *Alternatives technologiques pour une gestion correcte de l'énergie* ;
- Remplacement d'une technologie par une autre avec un meilleur rendement énergétique (par exemple un procédé à voie humide par un procédé à voie sèche). Voir la section 5.1 *Alternatives technologiques pour une gestion correcte de l'énergie* ;
- Remplacement des combustibles par des déchets ;
- Réduction du rapport clinker/ciment. Voir la section 5.1.4. *Réduction du rapport clinker/ciment* et la section 5.2.11.

Alternative	5.8.1. REMPLACEMENT DU COMBUSTIBLE PAR DES DÉCHETS
Action	Action : prévention à la source de la pollution. Remplacement du combustible.
Étape / Opération	Préparation du combustible.
Problématique environnementale	Production d'émissions de CO ₂ .
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Réduction des émissions de CO ₂ .
Description	Les émissions de CO ₂ , provenant de la combustion par kg de clinker, sont directement proportionnelles au contenu en carbone par unité d'énergie du combustible. Par conséquent, la substitution d'un combustible par un autre, avec un contenu moindre en carbone par unité d'énergie, entraîne une diminution des émissions de CO ₂ .

	Ainsi, l'utilisation de déchets provenant de certaines industries (déchets de distillation, solvants non-halogénés, certaines huiles) dangereuses ou non dangereuses, implique une diminution des émissions de CO ₂ , car les facteurs d'émission de GES sont inférieurs à ce qu'ils seraient en cas d'incinération ou d'enfouissement. Dans le cas de la biomasse, le coefficient d'émission est de zéro.
Procédure	Remplacement des combustibles par des déchets avec de faibles coefficients d'émission de CO ₂ .
Commentaires	La réduction du CO ₂ provenant de la combustion représente seulement une partie des émissions de CO ₂ . La substitution par de la biomasse entraîne une diminution des émissions de GES, puisque le coefficient d'émission est de zéro et le remplacement par des déchets non-biomasse ne réduit pas les émissions du secteur cimentaire, mais réduit les émissions du pays en évitant le traitement des déchets par enfouissement ou incinération.
Aspects économiques	Les aspects économiques relatifs à cette mesure sont ceux associés au coût de remplacement du combustible, qui varie autant que les prix locaux des combustibles.

5.9. ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR LA RÉDUCTION DES ODEURS

Les odeurs chimiques qui peuvent se répandre par la cheminée d'une cimenterie proviennent principalement du SO₂, et à un niveau moindre du NH₃ et des composés organiques, toutes avec un seuil de détection de 50 à 100 %, dans une plage de 100 ppt à 10 ppm.

En ce qui concerne les émissions d'odeurs diffuses, elles sont dues principalement au déchargement de combustible et aux emplacements de stockage, par conséquent, il est nécessaire de faire appel à une manutention adéquate lors des opérations de déchargement et de stockage.

Il est possible d'utiliser le terme « contrôle » des odeurs pour se référer aux procédés qui rendent une odeur particulière plus acceptable pour les personnes. Normalement, la méthode utilisée consiste à réduire l'intensité de l'odeur.

En ce qui concerne l'exploitation d'une cimenterie, la réduction de l'intensité de l'odeur est accompagnée d'une élimination des arômes dans le gaz, d'une élimination de la vapeur ainsi que d'une diminution des particules.

L'identification de l'odeur d'un arôme est déterminée par deux paramètres :

- Détection du seuil de l'odeur : défini comme la concentration de l'arôme à partir de laquelle l'odeur est détectée ;
- Indice de l'odeur : prend en compte également l'évaporation comme un rapport entre la pression de vapeur et les 100 % du seuil de détection comme arôme.

En général, les gaz comme les vapeurs sont odorantes. Les gaz pratiquement inodores sont les suivants : O₂, N₂, H₂, H₂O, CO, CO₂, CH₄, NO, ainsi que les gaz nobles.

Les odeurs peuvent être également associées aux particules transportées dans l'air, puisque certaines particules peuvent stimuler le sens de l'olfaction, qu'elles soient elles-mêmes volatiles ou qu'elles dégagent un arôme volatil.

5.10. ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR LE CONTRÔLE DES ÉMISSIONS DE BRUIT

De plus en plus, la réduction du bruit est considérée comme un aspect important à prendre en compte dans une cimenterie. Cet aspect est associé à une certaine controverse, peut-être moins à cause de la haute technologie requise pour la réduction du bruit dans les usines existantes qu'en raison des coûts élevés d'investissement et des difficultés pour mener à bien les modifications nécessaires.

À la différence des émissions de particules dans l'air, l'évaluation du bruit dans l'environnement dépend énormément des alentours de l'usine. Ainsi, pour l'application des mesures de réduction du bruit, il est donc nécessaire de prendre en compte l'impact qu'il provoque dans les zones résidentielles à proximité de l'usine.

Dans la pratique et dans la majorité des cas, les meilleures techniques de réduction du bruit peuvent être mises en œuvre sur les nouvelles installations. Cela montre l'importance d'une bonne conception acoustique, allant de l'étude préliminaire de la disposition de l'usine jusqu'au choix correct de la machinerie. La réduction du bruit la plus efficace est réalisée en surface.

Dans les usines existantes, les solutions dépendent de l'espace disponible, de l'état des structures préalables ainsi que des considérations architecturales.

Les flux d'air, la machinerie et le bruit des bâtiments sont les principales sources d'émission de bruit en surface.

5.10.1. Bruit généré par les flux d'air

Généralement, l'air qui circule dans un conduit, une canalisation ou une cheminée, génère un bruit, dont le niveau sonore dépend de la section transversale, du flux et de la vitesse.

Les vitesses de flux dépassant 15 à 20 m/s génèrent par elles-mêmes un bruit qui doit être réduit. L'installation de silencieux est l'une des seules techniques disponibles pour la réduction du bruit généré par les flux d'air.

Les silencieux doivent être installés le plus près possible de la surface génératrice du bruit et le plus loin possible de la sortie de celui-ci, en tenant compte du maintien de la vitesse de l'air après le dispositif réducteur.

Il existe trois types de silencieux utilisables :

- Revêtement simple des conduits avec des matériaux d'insonorisation, comme la laine de roche ou la laine de verre ;
- Silencieux à réflecteurs parallèles ;
- Silencieux de refoulement.

Les silencieux utilisés à l'entrée et à la sortie des compresseurs sont conçus normalement par les fournisseurs de la machinerie.

Les revêtements simples avec des matériaux d'insonorisation servent dans de nombreuses situations, et provoquent des chutes de pression très faibles tout en nécessitant, pour une efficacité de réduction de 1 à 2 dB/m, une installation sur de grandes longueurs.

Les silencieux à réflecteurs parallèles sont utilisés dans les conduits avec des variations de flux jusqu'à 250 000 m³/h et présentent une efficacité de réduction de 10 à 15 dB/m. Pour les variations de flux supérieures, ils peuvent cependant entraîner de fortes chutes de pression (40 à 60 mmWG).

Pour les variations de flux élevées, les silencieux de refoulement (série de chambres d'expansion alignées avec des isolants acoustiques) sont préférés, à cause de l'efficacité de leur réduction et la

faible chute de pression (20 mmWG maximum), mais ils impliquent des coûts d'investissement plus importants.

Les mesures primaires de contrôle du bruit en surface, comme un bon calibrage à l'entrée et à la sortie des conduits pour réduire la vitesse, ou la modification de la machinerie existante (par exemple des ventilateurs avec des pales aérodynamiques à faibles révolutions par minute), ne peuvent être que modérément efficaces.

5.10.2. Bruit généré par la machinerie

La machinerie est l'ensemble des équipements du processus susceptibles de produire du bruit, comme les concasseurs, les broyeurs, etc., ainsi que les ventilateurs, les moteurs et les compresseurs.

Dans certains cas, le bruit peut être réduit tout d'abord grâce à la sélection d'une machinerie moins bruyante. Les compresseurs sont normalement accouplés à un caisson insonorisé, conçu spécifiquement par les fournisseurs.

Dans d'autres cas, le bruit peut être réduit grâce à l'isolation de la machinerie avec des matériaux appropriés, ou en installant la machine à l'intérieur d'un caisson insonorisé. Dans tous les cas, il est nécessaire de prévoir un dispositif sûr de refroidissement, qui doit être également insonorisé, afin de dissiper la chaleur.

Les matériaux isolants utilisés sont la laine de roche de différentes épaisseurs (jusqu'à 120 kg/m³), la fibre de verre (jusqu'à 80 kg/m³) ou un revêtement en bois (jusqu'à 120 mm).

5.10.3. Bruit en provenance des bâtiments

Lorsque les mesures d'isolation, mentionnées précédemment, ne sont pas possibles à cause du manque d'espace disponible, ou de la disposition de l'usine, ou qu'ils ne fonctionnent pas suffisamment bien, l'unique solution est d'installer la machinerie dans un bâtiment ou de créer des murs écran pour réduire la propagation du son. Dans ces cas, il peut être également nécessaire d'installer des dispositifs de refroidissement, qui doivent être également insonorisés, afin de dissiper la chaleur.

Il est possible d'utiliser différents types de matériaux pour construire des murs écran, en évitant toujours la transmission des vibrations de la machinerie au sol ou de la structure au bâtiment. Si cela se produit, la façade peut se comporter comme une cage de résonance, générant des niveaux sonores à basse fréquence, mais avec une puissance élevée, en fonction de la surface totale de vibration.

L'efficacité du mur écran dépend proportionnellement de sa masse spécifique (kg/m³) et de la fréquence du son. Cette efficacité semble être plus importante pour les hautes fréquences.

Certains matériaux de construction des murs écran sont notamment :

- Parpaings en béton ou briques creuses : à cause de leur rigidité, ils fournissent une meilleure réduction du bruit avec une finesse de plus de 200 mm (150 kg/m²) ;
- Béton préfabriqué : pour la même raison, la finesse doit être supérieure à 80 mm (175 g/m²).

5.11. ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR LE CONTRÔLE DES VIBRATIONS

Ces dernières années sont apparus des problèmes de vibrations, associés à des structures plus délicates et compliquées et à des machines plus rapides et complexes. Ces problèmes vont de pair avec une demande de réduction des coûts et d'augmentation de l'efficacité.

L'intensité des vibrations est mesurée comme vitesse (m/s) ou comme accélération (m/s^2).

Aujourd'hui, seuls quelques pays ont mis en place des limitations pour les vibrations des structures ou les vibrations maximales gênantes pour les personnes. En outre, la transmission des vibrations aux sols ou aux structures des bâtiments industriels est également une source potentielle de production de bruit.

Des équipements de cimenterie provoquant des vibrations sont, par exemple, le broyeur à cylindres ou le silo de clinker.

5.11.1. Vibration du broyeur à cylindres

Toute machine caractérisée par de grandes vitesses de rotation et de contrainte constitue une source potentielle de production de vibrations. Pour éviter de telles vibrations, il est nécessaire de mettre en œuvre de bonnes pratiques environnementales, comme l'installation de ces machines sur des supports antivibrations et des fondations en béton. Si ces mesures ne fonctionnent pas correctement, il est nécessaire d'effectuer des investissements plus importants, pour isoler les fondations des machines et éviter ainsi la transmission des vibrations au reste de la structure.

5.11.2. Vibrations des silos de clinker

Les vibrations dans les silos de clinker ne sont pas fréquentes, mais peuvent être évitées ou réduites grâce à l'évaluation correcte de la structure, au contrôle de la qualité du clinker et de la température, ainsi qu'à une bonne distribution et au nombre de trémies d'extraction.

5.12. ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES POUR LE CONTRÔLE DES DÉCHETS

Les déchets dangereux doivent être correctement collectés, stockés, étiquetés et expédiés aux gestionnaires nommément désignés pour le traitement des déchets dangereux.

Les principes de base pour une gestion adéquate des déchets générés dans les cimenteries doivent comprendre les pratiques suivantes :

- Caractérisation des déchets pour déterminer leur dangerosité ;
- Étude de l'origine des déchets et des possibilités d'éviter ou de réduire leur génération ;
- Sélection et discrimination des déchets à la source ;
- Développement du recyclage et de la réutilisation des déchets non dangereux dans l'usine elle-même ou expédition à des gestionnaires compétents ;
- Protection des systèmes de stockage et de manipulation des déchets dangereux, de manière à minimiser le risque de pollution accidentelle des sols et des eaux.

5.13. TECHNIQUES ÉMERGENTES

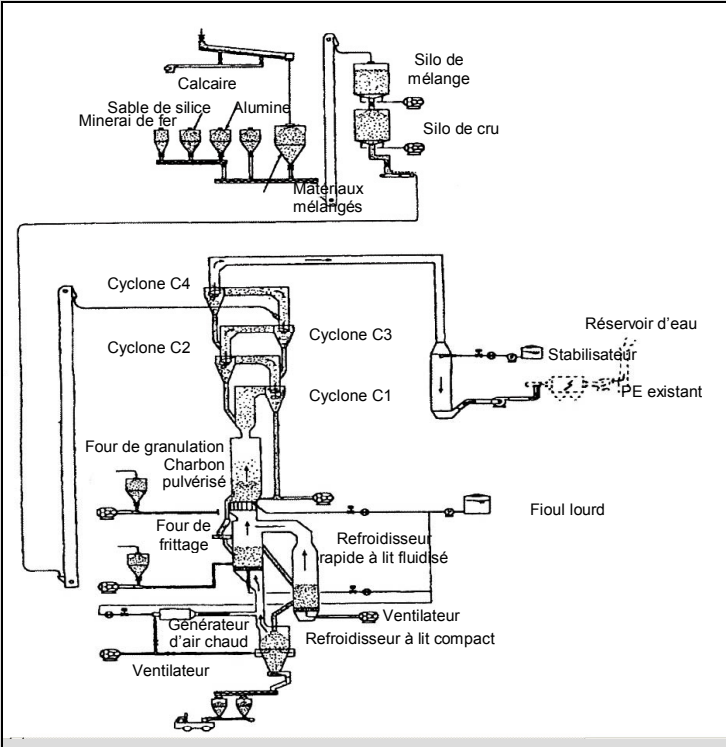
Les techniques émergentes sont celles qui ne sont pas encore assimilées par le marché, y compris celles qui sont en phase de recherche ou d'essai, et dont le développement n'est pas définitif parce que certains paramètres économiques et techniques ne sont pas encore connus.

Certaines techniques émergentes, décrites ci-après sous forme de fiche, sont les suivantes :

- **Technologies de prévention à la source** : celles qui consistent en changements technologiques sont des mesures préventives :
 - **Technologie de fabrication du clinker par lit fluidisé** ;

- **Combustion par étapes combinée avec la réduction non catalytique sélective (RNCS) ;**
- **Technologies finales :** celles qui agissent après la génération du dommage (pollution) sont des mesures correctives :
 - Réduction catalytique sélective (RCS).

Alternative	5.13.1. TECHNOLOGIE DE FABRICATION DU CLINKER PAR LIT FLUIDISÉ
Action	Action : traitement à la source. Modification du processus.
Étape du processus	Cuisson du clinker.
Problématique environnementale	Production de SO ₂ et NO _x . Consommation d'énergie élevée.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	La technologie de fabrication du clinker par lit fluidisé permet de réduire de 10 à 12 % les émissions de SO ₂ dues à la combustion, par rapport aux émissions de SO ₂ du four rotatif. Le niveau d'émission de NO _x est estimé à 380 mg/m ³ au maximum.
Description	La technologie de cuisson dans un four à lit fluidisé est un projet subventionné par le Ministère du commerce international et de l'industrie du Japon depuis 1986. Entre 1989 et 1995, une cimenterie pilote a fonctionné avec une capacité de 20 tonnes de clinker/jour, dans l'usine de Toshigi de Sumitomo Osaka Cement Co, Ltd. Fin 1995, une cimenterie pilote de 200 tonnes de clinker/jour a été construite. La figure suivante illustre la configuration du système de four à lit fluidisé de la cimenterie pilote de 20 tonnes de clinker/jour. Le système dispose d'un préchauffeur à suspension, d'un four de granulage à lit fluidisé, d'un four de frittage à lit fluidisé, d'un refroidisseur à refroidissement rapide à lit fluidisé et d'un refroidisseur à lit compact.

	 <p>Source : Association japonaise du ciment, 1996.</p> <p>Figure 5.13.1. Four à lit fluidisé.</p>
<p>Procédure</p>	<p>Le préchauffeur à suspension est un préchauffeur conventionnel à quatre étapes de cyclones, qui préchauffe le cru. Le four de granulation transforme le cru en granules d'environ 1,5 à 2,5 mm de diamètre à une température de 1 300 °C. Le four de frittage sert à compléter la clinkérisation des granules à une température de 1 400 °C. Le refroidisseur rapide à lit fluidisé refroidit rapidement le clinker de ciment qui passe de 1 400 °C à 1 000 °C. Puis le clinker de ciment est refroidi à environ 100 °C dans le refroidisseur à lit compact.</p>
<p>Commentaires</p>	<p>Le clinker de ciment produit dans le four à lit fluidisé est d'une qualité similaire au clinker produit par un four rotatif. Les émissions de NO_x sont de 115 - 190 mg/Nm³ lors de l'utilisation de fioul lourd et de 440 - 515 mg/Nm³ lors de l'utilisation de charbon pulvérisé comme combustible (émissions de référence à 10 % d'oxygène). Les études de viabilité d'une cimenterie de 3 000 tonnes de clinker/jour considèrent que la consommation énergétique pourrait être inférieure de 10 à 12 % à celle correspondant à un four rotatif avec préchauffeur à cyclones et refroidisseur à grille, et, par conséquent les émissions du SO₂ de combustion pourraient être réduites de 10 à 12 % [Cembureau, 1997].</p>
<p>Aspects économiques</p>	<p>En résumé, les avantages que présenterait le développement du système de lit fluidisé dans les fours à ciment, d'un point de vue économique, seraient :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Réduction de la consommation énergétique de 10 à 12 % ; • Réduction de 30 % des coûts de construction ; • Réduction de 30 % de la surface installée.

Alternative	5.13.2. COMBUSTION PAR ÉTAPES COMBINÉE AVEC LA RÉDUCTION NON CATALYTIQUE SÉLECTIVE (RNCS)
Action	Action : traitement à la source. Modification du processus.
Étape du processus	Cuisson du clinker.
Problématique environnementale	Production d'émissions de NO _x dans l'atmosphère.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	L'efficacité de la réduction des NO _x peut atteindre des valeurs entre 30 et 80 %, plus importantes lorsque le rapport molaire NH ₃ /NO ₂ est élevé. En outre, lorsque des rapports molaires supérieurs à l'unité sont utilisés, il se produit une augmentation significative des émissions d'ammoniac dans l'atmosphère.
Description	Cette technique consiste en une combinaison en série d'un précalcinateur avec combustion par étapes et l'ajout de composés ammoniacaux pour réduire les oxydes d'azote.
Procédure	Les essais réalisés ces dernières années semblent indiquer que l'injection d'ammoniac doit être réalisée relativement loin de la chambre de combustion, pour que l'efficacité de la réduction ne soit pas diminuée par la concurrence qui s'établit entre les réactions de combustion et de réduction des NO _x .
Commentaires	Les autres effets observés sont l'augmentation des émissions de CO, l'augmentation de la consommation d'énergie et la diminution de la capacité de production, par l'introduction de volumes de gaz qui doivent circuler dans la tour des cyclones.
Aspects économiques	Le coût total sera approximativement celui de la somme des coûts de chacun des procédés combinés [Cembureau, 1997].

Alternative	5.13.3. RÉDUCTION CATALYTIQUE SÉLECTIVE (RCS)
Action	Action : traitement final.
Étape du processus	Cuisson du clinker.
Problématique environnementale	Production d'émissions de NO _x dans l'atmosphère.
Bénéfices environnementaux de l'alternative	Ce procédé permet d'atteindre une efficacité de la réduction de 85 à 95 %. La réduction catalytique sélective (RCS) avec ammoniac se présente comme la meilleure technologie disponible actuellement pour la diminution des niveaux de NO _x dans les flux gazeux des sources fixes. Cette technique possède un potentiel de réduction élevé non seulement des NO _x , mais également des COV, du CO et des dioxines.
Description	La RCS est appliquée avec satisfaction dans d'autres industries. Dans l'industrie du ciment, il n'existe pas encore une seule installation RCS à échelle industrielle. Les caractéristiques des gaz de combustion du four à ciment font qu'il est nécessaire d'adapter la RCS existante des autres industries spécifiquement pour l'industrie du ciment.

	<p>Les études et les essais pilote prennent en compte deux options :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Traitement des gaz avant le dépeussierage (charge élevée en particules). • Traitement des gaz après le dépeussierage (charge faible en particules). <p>Cette dernière option nécessite de réchauffer les gaz après le filtre de dépeussierage, ce qui implique une dépense énergétique supplémentaire.</p> <p>Des expérimentations ont été réalisées dans des usines pilotes pour le traitement de petites fractions de gaz (3 %) en Autriche, Allemagne, Italie et Suède. Les niveaux d'émission de NO_x se situaient dans une plage de 100 à 200 mg/Nm³. [Rapport MTD Espagne].</p>
<p>Procédure</p>	<p>Dans ce procédé, l'ammoniac, normalement dilué avec de l'air ou de la vapeur d'eau, est injecté sous l'unité de combustion, via un système de grille, dans le flux des gaz chauds. Le mélange des gaz et du réactif passe à travers un lit de catalyseur, où les réactions de réduction catalytique des NO_x sont effectuées en présence d'oxygène.</p> <p>Les réactions principales sont</p> $4\text{NH}_3 + 4\text{NO} + \text{O}_2 \longrightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ $4\text{NH}_3 + 2\text{NO}_2 + \text{O}_2 \longrightarrow 3\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ <div data-bbox="593 976 1353 1335" style="text-align: center;"> </div> <p>Source : M.J. Bradley & Associates.</p> <p>Figure 5.13.2. Schéma du procédé RCS.</p> <p>La plage optimale des températures pour ces réactions catalytiques doit être comprise entre 300 et 400 °C. [NO_x, EPA].</p> <p>La température, la quantité d'agent réducteur, la conception de la grille d'injection de l'ammoniac et l'activité du catalyseur sont les facteurs principaux qui déterminent l'efficacité de l'élimination réelle.</p> <p>Les fuites de NH₃ dans la RCS sont inférieures à ce qui pourrait se produire dans un système RNCS pour une haute efficacité de la réduction. Si les quantités d'ammoniac émises par les matières premières sont significatives, la RCS utilise ces émissions pour réduire les NO_x dans la réaction catalytique et la quantité d'ammoniac émise est ainsi réduite.</p> <p>S'il se produit des fuites d'ammoniac, celui-ci peut réagir avec le SO₂ et les autres composants des gaz de combustion du four, donnant lieu à la formation d'aérosols [Cembureau, 1997].</p>
<p>Commentaires</p>	<p>L'une des questions critiques à résoudre pour garantir la viabilité technique et économique du système est l'abrasion du catalyseur, qui a été sévère dans certains essais réalisés.</p>

	<p>Les autres questions qui soulèvent des incertitudes sur l'application de la RCS sont l'élimination de la poussière du catalyseur, la longévité des catalyseurs et l'ensemble des coûts d'investissement. [Rapport MTD Espagne].</p> <p>L'utilisation du catalyseur induit deux avantages principaux pour le procédé de RCS par rapport à la RNCS : efficacité du contrôle des NO_x plus élevée et réactions dans une plage plus large et plus basse. Ces avantages sont accompagnés d'une augmentation significative des coûts d'investissement et d'exploitation.</p>
Aspects économiques	<p>Parmi les systèmes de RCS possibles, seul celui du traitement des gaz avant le dépolluissage (charge élevée en particules) a été pris en compte, parce que les coûts d'investissement et d'exploitation, ainsi que la consommation de chaleur, sont bien moindres que dans le cas du traitement après le dépolluissage (charge faible en particules) [Cembureau, 1997].</p> <p>Les coûts globaux de cette technique émergente ont été évalués entre 2 et 4 €/tonne de clinker, avec des coûts d'investissement compris entre 5 et 10 M€. [Rapport MTD Espagne]. Ces coûts incluent l'unité de réduction catalytique sélective, le réservoir de stockage de l'ammoniac, le système d'injection de l'ammoniac et le préchauffeur nécessaire pour que les gaz soient dans la plage optimale de température favorable à la réalisation de la réduction.</p>

6. CAS PRATIQUES

Le présent chapitre fournit des exemples d'alternatives de prévention de la pollution à la source et de traitements finals. Chacun des exemples est détaillé sous forme de fiche. Celle-ci résume l'alternative mise en œuvre par une entreprise particulière sur la base de ses objectifs, autant environnementaux qu'économiques, décrit les résultats obtenus après l'application de la mesure et fournit les données économiques relatives à l'application concernée.

Les informations mentionnées dans les fiches ont été obtenues principalement à partir de publications bibliographiques. Cela signifie que les informations présentes dans les sections d'estimation économique, les résultats et les économies obtenues sont donnés à titre indicatif.

Les implantations d'alternatives de prévention de la pollution à la source et des traitements finals ont permis aux entreprises d'obtenir des améliorations environnementales et productives. La mise en pratique des alternatives décrites au chapitre 6 du présent manuel représente, dans la majorité des cas, un succès autant au niveau de la pollution, qu'au niveau économique, sans oublier l'amélioration de la qualité du produit.

Cas pratique 1	6.1.1. INSTALLATION D'UN BROYEUR À CYLINDRES HORIZONTAL
Pays	ITALIE.
Type d'usine	Usine de broyage de clinker.
Problématique environnementale	Faible valorisation de l'énergie. Émission de CO ₂ .
Objectif	Prévention à la source. Réduction de la production des émissions dans l'atmosphère et valorisation énergétique.
Antécédents	L'usine disposait jusqu'en septembre 1993 d'un broyeur à boulets en circuit ouvert et d'un broyeur à boulets en circuit fermé. Toute l'étape de broyage possédait une capacité approximative de 480 kt/an.
Mesure appliquée	<p>Un broyeur à cylindres horizontal de 400 kW a été installé en 1993. Il s'agissait d'une nouvelle technologie qui devait être testée à l'échelle industrielle.</p> <p>Le nouveau broyeur à cylindres horizontal (Horomill 2200) possédait une capacité de 220 kt/an pour le broyage de ciment. Ce type de broyeur permet d'économiser 40 % d'énergie par rapport à la consommation d'un broyeur à boulets conventionnel. La ventilation peut être réalisée avec de l'air frais, ou bien de l'air chaud pour le séchage des matières premières.</p> <p>L'amélioration portait sur l'installation, dans un nouveau circuit fermé, d'un broyeur à cylindres horizontal qui fonctionnait avec plusieurs compressions. Ce système utilise moins de pression que celle utilisée dans une presse à rouleaux et fait appel à des dispositifs internes pour assurer l'avance du matériau et son concassage ultérieur, garantissant sa réduction jusqu'à la granulométrie souhaitée.</p> <p>Les caractéristiques principales du broyeur à cylindres sont :</p>

	<ul style="list-style-type: none"> • Une consommation d'énergie moindre, similaire à celle de la presse à rouleaux ; • Un procédé de broyage similaire à celui du broyeur à boulets qui permet d'obtenir le même produit final ; • Une fiabilité et une durée de vie similaires à celles du broyeur à boulets. 						
<p>Résultats obtenus</p>	<p>Des problèmes liés à la résistance du revêtement des rouleaux ont été détectés, puis finalement résolus.</p> <p>Le broyeur fonctionne de manière très stable et présente de faibles niveaux de vibration. En outre, il est doté d'un système automatique de contrôle intégré et, puisqu'il offre une réponse rapide aux changements des entrées, il possède un bon comportement en exploitation normale. Ainsi, cela implique des temps de conditionnement plus courts, ce qui entraîne une économie d'énergie, puisque le temps improductif de la machine est réduit.</p> <p>Quant au niveau de bruit, certains problèmes ont été observés à cause des engrenages réducteurs. La conclusion a été que pour les futurs broyeurs, des engrenages de type hélicoïdal devaient être utilisés, de 1 000 tr/min maximum, pour atteindre ainsi des niveaux de bruit de 80 dB, plutôt inférieurs aux niveaux de bruit atteints par les broyeurs à boulets.</p> <p>Les économies d'énergie espérées de 35 à 41 % pour le broyage du ciment ont été facilement atteintes et sans problème, alors que le concassage de la matière première n'a entraîné une économie d'énergie que de 35 %, par rapport aux 50 % espérés. Cela était dû au surdimensionnement de certains des composants de l'usine et généralement, au fait que le broyeur n'avait pas été spécialement conçu pour le concassage de la matière première.</p> <p>Résumé des résultats :</p> <table border="1" data-bbox="448 1178 1370 1373"> <thead> <tr> <th></th> <th>Économie d'énergie (%) (*)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Broyage du ciment</td> <td>35 - 41</td> </tr> <tr> <td>Concassage de matière première</td> <td>35</td> </tr> </tbody> </table> <p>(*) Par rapport à la consommation d'un broyeur à boulets.</p> <p>La qualité du produit obtenu a été la même ou supérieure à celle obtenue par un broyeur à boulets. Le ciment produit avec le nouveau broyeur à cylindres horizontal pour une même finesse possède une meilleure résistance que celui produit par les broyeurs à boulets.</p>		Économie d'énergie (%) (*)	Broyage du ciment	35 - 41	Concassage de matière première	35
	Économie d'énergie (%) (*)						
Broyage du ciment	35 - 41						
Concassage de matière première	35						
<p>Aspects économiques</p>	<p>Un investissement de 3,5 millions de dollars est nécessaire pour l'installation du petit broyeur Horomill à l'échelle industrielle. (*)</p> <p>(*) En 2002, cette usine a installé un nouveau broyeur à cylindres horizontal (modèle 3800) d'une capacité de 600 000 t/an, dans l'espoir de réduire les coûts énergétiques de 10 kWh/tonne de ciment et de diminuer les frais de maintenance.</p>						

Source : wbcasd, 2002 et Commission européenne « Énergie ».

Cas pratique 2	6.1.2. CIRCUIT FERMÉ DE L'EAU DE REFROIDISSEMENT
Pays	FRANCE.
Type d'usine	Intégrée.
Problématique environnementale	Consommation élevée de l'eau de refroidissement. Risques de pollution par rejets dans une rivière.
Objectif	Prévention à la source. Diminution de la consommation d'eau et des rejets dans la rivière.
Antécédents	<p>L'usine en question se situe dans le Centre-Est de la France, entre le canal de Bourgogne et la rivière Armançon.</p> <p>La consommation en eau de l'usine était principalement due à son utilisation pour le refroidissement des installations.</p> <p>À l'origine, l'usine avait été conçue avec un système de réfrigération à circuit ouvert, ce qui signifiait que l'eau utilisée pour le refroidissement des équipements était traitée dans un bassin de sédimentation, puis dans un séparateur de graisses et ensuite rejetée dans la rivière Armançon.</p>
Mesure appliquée	<p>En janvier 2000, il a été décidé d'installer un système de refroidissement en circuit fermé. Le projet supposait le conditionnement de certains réservoirs, à l'époque inutilisés, pour le stockage de l'eau, l'installation d'un pompage et d'une tour de refroidissement.</p> <p>De cette manière, l'eau de refroidissement est actuellement récupérée et recyclée dans la tour de refroidissement, où elle est refroidie par ventilation avec l'air ambiant. Puis, l'eau froide est de nouveau pompée dans le circuit de refroidissement.</p>
Résultats obtenus	Ce projet a permis d'atteindre une économie de la consommation d'eau de 75 % et, par conséquent, une réduction des polluants associés aux rejets dans la rivière Armançon.
Aspects économiques	Coûts d'investissement de la mesure appliquée : 415 000 €

Source : Lafarge.

Cas pratique 3	6.1.3. INSTALLATION D'UN FILTRE HYBRIDE
Pays	ESPAGNE.
Type d'usine	Intégrée.
Problématique environnementale	Émission élevée de particules.
Objectif	Traitement final. Diminution des émissions de particules conformément à la future législation.
Antécédents	La capacité de la cimenterie était de 1 850 t/jour. En 1999, il a été décidé de remplacer l'électrofiltre du four existant par un système de filtre hybride, puisque les niveaux d'émission impliquaient un dépassement des limites fixées par la future législation.

	<p>Il convient de souligner que la disposition concentrée des différentes installations de l'usine apporte de nombreux avantages d'un point de vue exploitation, mais rend difficile les éventuelles modifications.</p>						
<p>Mesure appliquée</p>	<p>Avec l'objectif de diminuer les émissions de particules, le projet visait à conditionner les gaz du filtre avec de l'air ou de l'eau, puisque l'usine se situe dans une zone semi-désertique.</p> <p>Cette transformation, à cause de la forte demande en ciment, devait être réalisée pendant l'arrêt prolongé du four pour le changement du revêtement réfractaire.</p> <p>En outre, le nouveau projet devait prévoir l'augmentation de la production du four à 2 400 t/jour.</p> <p>La mesure implantée impliquait l'agrandissement du châssis de l'électrofiltre existant pour installer les filtres à manches, en tenant compte de l'augmentation de la production du four. Le milieu filtrant choisi a été le GORE-SUPERFLEX, car il supporte un plus grand nombre de cycles de nettoyage que les milieux filtrants traditionnels. 2 542 manches ont été installées, avec une surface active de 7 779 m².</p> <div data-bbox="485 840 1337 1234" data-label="Diagram"> </div> <p>Figure 6.1.1. Schéma de fonctionnement d'un filtre hybride.</p>						
<p>Résultats obtenus</p>	<p>Une année après l'installation du filtre hybride, l'efficacité de cette technologie reste démontrée pour le dépoussiérage des gaz. Les émissions sont en permanence inférieures à 8 mg/Nm³.</p> <table border="1" data-bbox="450 1406 1366 1585"> <thead> <tr> <th></th> <th>Émissions de particules (mg/m³)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Avant la mesure</td> <td>60 – 75</td> </tr> <tr> <td>Après la mesure</td> <td><8</td> </tr> </tbody> </table> <p>La chute de pression résultante a été de 6,5 mbar, inférieure même à la valeur garantie par le fabricant de 7,5 mbar.</p> <p>Après l'application de cette mesure, la possibilité de remplacer complètement l'eau de refroidissement par de l'air frais a été testée, sans rencontrer de restrictions du processus avec des combustibles conventionnels.</p> <p>Pendant les arrêts peu nombreux du champ électrostatique par des tirs de CO, l'ensemble de manches a fonctionné sans problème, c'est-à-dire sans augmentation excessive de la chute de pression et surtout sans augmentation des émissions de poussière.</p>		Émissions de particules (mg/m ³)	Avant la mesure	60 – 75	Après la mesure	<8
	Émissions de particules (mg/m ³)						
Avant la mesure	60 – 75						
Après la mesure	<8						
<p>Aspects économiques</p>	<p>Les coûts estimés sont inférieurs à 3 millions d'euros.</p>						

Source : Cemento y Hormigón, mai 2004.

Cas pratique 4	6.1.4. INSTALLATION DE CYCLONES							
Pays	TURQUIE.							
Type d'usine	Intégrée.							
Problématique environnementale	Émission de particules.							
Objectif	Traitement final. Diminution de l'émission de particules.							
Antécédents	<p>Cette usine a été construite en 1911 avec une capacité de 20 000 tonnes. Par la suite, elle a été améliorée en 1923 pour atteindre une capacité de production de 40 000 tonnes.</p> <p>Pendant la fabrication du ciment, les matières premières (calcaire et argile) sont chauffées dans un four rotatif, provoquant l'émission de gaz chargés de poussière. Les gaz passent à travers différents précipitateurs électrostatiques, avant d'être émis dans l'atmosphère. L'un des quatre précipitateurs, dont disposait l'usine, ne permettait pas d'atteindre un niveau acceptable de réduction des particules.</p>							
Mesure appliquée	<p>Pour améliorer l'efficacité des précipitateurs électrostatiques, un séparateur cyclonique à grande portée a été installé à la tête de l'unité de dépoussiérage, de telle manière que celui-ci retient les particules les plus grosses, afin que les précipitateurs reçoivent une quantité moins importante de particules, garantissant ainsi leur efficacité optimale.</p>							
Résultats obtenus	<p>Le tableau suivant compare les émissions de particules avant et après l'installation des cyclones. Comme il est possible de le constater, les émissions ont diminué de 72 %.</p> <table border="1" data-bbox="528 1207 1458 1400"> <thead> <tr> <th></th> <th>Émissions de particules (mg/m³)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Avant la mesure</td> <td>180</td> </tr> <tr> <td>Après la mesure</td> <td>50</td> </tr> </tbody> </table> <p>Avec cette réduction, les émissions de particules se situent en dessous des limites de la réglementation locale.</p>			Émissions de particules (mg/m ³)	Avant la mesure	180	Après la mesure	50
	Émissions de particules (mg/m ³)							
Avant la mesure	180							
Après la mesure	50							
Aspects économiques	Coûts d'investissement de la mesure appliquée : 620 000 €							

Source : Lafarge.

Cas pratique 5	6.1.5. INSTALLATION DE FILTRES À MANCHES	
Pays	BOSNIE-ET-HERZÉGOVINE.	
Type d'usine	Intégrée.	
Problématique environnementale	Émission de particules.	
Objectif	Traitement final. Diminution de l'émission de particules.	

<p>Antécédents</p>	<p>Le système de filtration existant, des précipitateurs électrostatiques (PE), n'avait pas réussi à atteindre son rendement maximal depuis son installation il y a 30 ans. Les hautes concentrations de CO dans les gaz de combustion du four (pics de CO) et les interruptions fréquentes de la fourniture d'énergie provoquaient l'arrêt des PE, ce qui entraînait des émissions de particules très élevées, plusieurs fois par jour.</p> <p>Cette problématique a provoqué une augmentation de la sensibilisation de la population et des discussions difficiles avec les autorités locales, qui se sont terminées par un arrêt de la production en 2000.</p>						
<p>Mesure appliquée</p>	<p>L'entreprise décida alors d'effectuer un gros investissement afin de moderniser ses installations. L'un des projets d'investissement les plus importants fut l'amélioration du système de filtrage de l'usine, réalisée en 2002.</p> <p>Il a été décidé de remplacer les PE existants et les séparateurs cycloniques du refroidisseur de clinker par des filtres à manches. Cette nouvelle technologie était prévue pour réduire les émissions de 96 %.</p> <p>De plus, le système de dépoussiérage impliquait une série de changements associés. Le gaz résiduel du refroidisseur est désormais envoyé à la tour de préchauffage, où il est mélangé à l'air résiduel qui arrive directement en provenance du four et du broyage des matières premières. L'autre option est d'envoyer le gaz résiduel froid de nouveau vers le broyage des matières premières. Ensuite, le gaz passe à travers du nouveau filtre, avant d'être émis dans l'atmosphère.</p> <p>Ce système est innovant pour ce qui concerne la valorisation des gaz résiduels du refroidisseur à d'autres fins, et l'épuration du mélange gazeux dans un filtre commun est un système nouveau.</p>						
<p>Résultats obtenus</p>	<p>Les filtres à manches ont fonctionné avec satisfaction, selon les prévisions de l'usine.</p> <p>Résultats obtenus :</p> <table border="1" data-bbox="448 1283 1369 1473"> <thead> <tr> <th></th> <th>Émissions de particules (mg/m³)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Avant la mesure</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>Après la mesure</td> <td>< 25</td> </tr> </tbody> </table> <p>Les mesures de l'émission de particules ont indiqué que les valeurs ont été atteintes, inférieures même aux valeurs garanties.</p> <p>Cette diminution a entraîné une amélioration considérable de la qualité de l'air, créant une image très positive de la cimenterie au sein de la population et pour les autorités gouvernementales.</p> <p>Les autres avantages ont été les suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Meilleure efficacité du système de production ; • Réduction de la consommation en combustible à cause du recyclage des gaz chauds ; • Diminution du bruit. 		Émissions de particules (mg/m ³)	Avant la mesure	150	Après la mesure	< 25
	Émissions de particules (mg/m ³)						
Avant la mesure	150						
Après la mesure	< 25						
<p>Aspects économiques</p>	<p>Les coûts d'investissement du système de filtration ont été d'environ 9 millions d'euros.</p>						

Source : HeidelbergCement.

Cas pratique 6	6.1.6. IMPLÉMENTATION D'UN SYSTÈME DE CONTRÔLE DU PROCESSUS
Pays	ESPAGNE.
Type d'usine	Intégrée.
Problématique environnementale	Perte d'énergie. Émissions de polluants atmosphériques.
Objectif	Prévention à la source. Augmentation de l'efficacité du système de production. Réduction des émissions atmosphériques polluantes.
Antécédents	Cette cimenterie a été construite en 1967, puis agrandie ensuite à deux occasions. Actuellement, elle dispose d'une capacité de production effective de 1 800 000 t/an. Le système de fabrication est à voie sèche et le combustible utilisé est du coke de pétrole. L'usine est constituée de 3 fours de production de clinker (fours avec préchauffeur et précalcinateur à 4, 5 et 6 étapes de cyclones), trois broyeurs de cru, deux broyeurs de charbon et trois broyeurs de ciment (broyeur à boulets en circuit fermé).
Mesure appliquée	En 2000, l'entreprise a réalisé des investissements pour moderniser les installations et un système de contrôle du processus a été installé pour faciliter l'obtention et la manipulation des informations, réussissant l'optimisation du processus de production et obtenant une réduction de l'écart-type relatif aux conditions d'alimentation des fours. L'augmentation de la stabilité du processus et l'augmentation des rendements énergétiques des fours de l'usine ont entraîné la réduction de l'émission spécifique de CO ₂ dans la production du clinker.
Résultats obtenus	Réduction de 16 000 tonnes de CO ₂ pendant l'année 2000. Réduction de 18 kcal/kg de clinker dans la consommation calorifique moyenne de l'usine. Meilleure stabilité d'exploitation des fours en augmentant l'efficacité et le fonctionnement.
Aspects économiques	Les coûts d'investissement de cette mesure sont négligeables. Les bénéfices économiques pendant l'année 2000 ont été de 165 000 \$.

Source : CEMEX.

Cas pratique 7	6.1.7. IMPLÉMENTATION D'UN PROGRAMME DE MAINTENANCE
Pays	ÉGYPTE.
Type d'usine	Intégrée.
Problématique environnementale	Perte d'énergie. Émissions de polluants atmosphériques.
Objectif	Prévention à la source. Augmentation de l'efficacité du système de production. Réduction des émissions atmosphériques polluantes.

Antécédents	<p>En 1994, l'entreprise a décidé d'introduire les concepts d'une production propre dans cette usine. En se basant sur des études préalables réalisées sur le site, il a été décidé de se concentrer sur le fonctionnement du four à ciment.</p> <p>Les données de production et du laboratoire ont été utilisées pour déterminer les quantités d'entrée et de sortie pendant une année, et pour réaliser le bilan des masses pour l'exploitation du four.</p> <p>Ce bilan a démontré qu'il existait un déséquilibre de 136 tonnes de matière première par jour, ce qui indiquait une réduction potentielle des émissions et des déchets.</p>
Mesure appliquée	<p>La mesure implémentée n'a pas consisté à appliquer une nouvelle technologie, mais une nouvelle planification du programme de maintenance.</p> <p>La maintenance préventive a été augmentée et de petits changements ont été opérés pour garantir un fonctionnement continu et un meilleur réglage des éléments métalliques et minimiser ainsi les pertes tout au long du processus.</p> <p>Un programme de maintenance a été rédigé et son application a été contrôlée de manière plus exhaustive.</p>
Résultats obtenus	<p>Après la mesure, 3 600 tonnes de particules en moins ont été émises la première année, réduisant la pollution de l'environnement le plus proche.</p>
Aspects économiques	<p>Les coûts d'investissement de cette mesure sont négligeables.</p> <p>Les économies annuelles obtenues se sont élevées à 132 000 \$ (économie de 12 tonnes dans la consommation de matière première par jour).</p>

Source : UNIDO.

7. GLOSSAIRE

adjuvant – *addition / additive* – produit qui est incorporé au ciment hydraulique ou mélangé en quantités limitées à celui-ci, que ce soit comme « adjuvant de processus » pour faciliter la fabrication ou la manipulation du ciment ou comme « adjuvant fonctionnel » pour modifier les propriétés du produit fini.

accélérateur – *accelerating admixture* – adjuvant qui augmente la vitesse d'hydratation du ciment hydraulique et qui, par conséquent, réduit le temps de prise, ou qui augmente la vitesse du développement de la résistance, ou les deux.

agent – *agent* – terme général qui s'applique à un matériau qui peut être utilisé soit comme adjuvant pour le ciment, soit comme ingrédient pour le béton, par exemple un agent aérateur.

liants – *binders* – matériaux cimentaires, qu'il s'agisse de ciments hydratés ou de produits de ciment ou de chaux et de matériaux siliceux réactifs ; les différents ciments ainsi que les conditions de séchage déterminent le type général du liant ; ce terme est également utilisé pour définir les matériaux comme l'asphalte, les résines et les autres matériaux qui composent la matrice des bétons, des mortiers et des coulis sableux.

alcali – *alkali* – sels des métaux alcalins, notamment le sodium et le potassium qui entrent dans la composition du béton et du mortier, généralement mentionnés dans les analyses chimiques comme les oxydes Na_2O et K_2O .

alite – *alite* – nom employé par Tornebohm (1897) pour identifier le silicate tricalcique avec de petites quantités de MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 et d'autres oxydes ; c'est le composant principal du clinker de ciment Portland.

alumine – *alumina* – oxyde d'aluminium (Al_2O_3).

aluminat tricalcique – *tricalcium aluminate* – composé, dont la composition chimique $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ est abrégée en C3A.

aluminoferrite tétracalcique – *tetracalcium aluminoferrite* – composé de la famille des aluminoferrites, dont la composition est $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (abrégée en C4AF), et qui est généralement considéré comme l'aluminoferrite présente dans les calculs sur les composés réalisés à partir des résultats de l'analyse chimique du ciment Portland.

bauxite – *bauxite* – roche composée principalement d'oxydes d'aluminium anhydres ; le principal minerai d'aluminium ; matière première pour la fabrication du ciment d'aluminat de calcium.

bélite – *belite* – nom utilisé par Tornebohm (1897) pour identifier une forme de composant du clinker de ciment Portland, connu sous sa forme pure comme silicate dicalcique ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$).

chaux – *lime* – appelée plus précisément oxyde de calcium (CaO) ; en général, terme qui s'applique aux différentes formes physiques et chimiques de la chaux vive, de la chaux hydratée et de la chaux hydraulique hydratée.

chaux libre – *free lime* – oxyde de calcium (CaO), comme dans le clinker et le ciment, qui ne s'est pas mélangé avec SiO_2 , ni avec Al_2O_3 , ni avec Fe_2O pendant le processus de calcination, généralement à cause d'une calcination incomplète, d'un broyage insuffisant du mélange de cru ou de la présence de quantités minimales d'inhibiteurs.

calciner – *calcine* – altérer une composition ou un état physique chauffé en dessous de la température de fusion.

calcite – *calcite* – minéral composé de carbonate de calcium (CaCO_3) et d'une structure cristalline particulière ; principal composant du calcaire, de la craie et du marbre ; il est utilisé comme l'un des composants principaux lors de la fabrication du ciment Portland.

calcaire – *limestone* – roche sédimentaire composée essentiellement de carbonate de calcium.

carbonatation – *carbonation* – réaction entre le dioxyde de carbone et un hydroxyde ou un oxyde pour former un carbonate, notamment dans un lait de ciment, de mortier ou de béton ; réaction avec des composés de calcium qui produit un carbonate de calcium.

ciment – *cement* – (voir ciment hydraulique – *hydraulic cement*).

ciment en vrac – *bulk cement* – ciment transporté et livré en vrac (généralement dans des véhicules spécialement conçus) et non en sacs.

ciment asphaltique – *asphalt cement* – asphalte fluidifié ou non fluidifié spécialement préparé en termes de qualité et de consistance pour être utilisé directement dans la fabrication de revêtements bitumineux, et qui possède une pénétration à 25 °C (77 °F) comprise entre 5 et 300, sous une charge de 100 g appliquée pendant 5 s.

ciment blanc – *white cement* – ciment Portland qui s'hydrate en formant une pâte blanche ; il est fabriqué à partir de matière première pauvre en fer, dont le clinker est calciné avec une flamme réductrice.

ciment d'aluminate de calcium – *calciumaluminate cement* (également *aluminate cement* ou *aluminous cement*) – produit obtenu par pulvérisation d'un clinker composé essentiellement d'aluminates de calcium hydrauliques, produits pendant la fusion ou le frittage d'un mélange dosé avec précision en calcaires et matériaux alumineux ; au Royaume-Uni, ce ciment est appelé *high-alumina cement*.

ciment hydraulique – *hydraulic cement* – ciment qui prend et qui durcit par interaction chimique avec l'eau, et qui est donc capable de prendre sous l'eau.

ciment hydrophobe – *hydrophobic cement* – ciment non hydraté, traité de manière à réduire sa tendance à absorber l'humidité.

ciment chargé – *blended cement* – ciment hydraulique, constitué essentiellement d'un mélange approfondi et uniforme de laitier granulé et de chaux hydratée ; ou un mélange approfondi et uniforme de ciment Portland et de laitier granulé, de ciment Portland et de pouzzolane ou de ciment Portland de laitier de haut-fourneau et de pouzzolane ; il est obtenu en broyant ensemble du clinker de ciment Portland et les autres matériaux, en mélangeant le ciment Portland avec les autres matériaux, ou bien en combinant le produit du broyage avec le mélange.

ciment naturel – *natural cement* – ciment hydraulique, obtenu en calcinant un calcaire argileux à une température inférieure au point de frittage, puis en broyant le produit calciné pour obtenir une poudre fine.

ciment normal – *normal cement* – ciment Portland à usage général ; aux États-Unis, il est dénommé ciment collant de type I – *sticky cement* – un ciment fini qui présente une fluidité faible ou nulle pendant ou après son stockage en silos, ou après un transport en vrac, en wagons à trémie, etc. ; ce phénomène peut être dû : (a) au liage des particules ; (b) au compactage mécanique ; (c) à l'attraction électrostatique entre particules. (Voir également prise pendant le stockage – *warehouse set*).

ciment Portland – *portland cement* – ciment hydraulique, obtenu par pulvérisation du clinker de ciment Portland et qui contient généralement du sulfate de calcium.

ciment Portland contenant du laitier de haut-fourneau – *portland blast-furnace slag cement* – ciment hydraulique constitué d'un mélange finement broyé de clinker de ciment Portland et de laitier de haut-fourneau granulé, ou bien d'un mélange approfondi et uniforme de ciment Portland et de laitier de haut-fourneau finement granulé, dont la quantité de laitier est comprise dans des limites précises.

ciment Portland modifié – *modified portland cement* – ciment Portland qui possède une chaleur d'hydratation modérée ; à partir de 1960, ce terme fut remplacé par « ciment de type II ».

ciment Portland ordinaire – *ordinary portland cement* – terme utilisé au Royaume-Uni et dans d'autres pays pour désigner l'équivalent du ciment Portland ordinaire ou du ciment de type I des États-Unis ; en anglais, le sigle OPC est fréquemment utilisé.

ciment Portland pouzzolanique – *portland pozzolan cement* – ciment hydraulique constitué d'un mélange approfondi et uniforme de ciment Portland ou de ciment Portland avec du laitier de haut-fourneau et de pouzzolane fine, obtenu en broyant ensemble du clinker de ciment Portland et la pouzzolane, en mélangeant le ciment Portland ou le ciment Portland avec du laitier de haut-fourneau et la pouzzolane finement divisée ou en combinant le produit du broyage et le mélange, dans lequel la quantité de pouzzolane est comprise dans des limites précises.

ciment sursulfaté – *supersulfated cement* – ciment hydraulique obtenu en broyant profondément un mélange de laitier de haut-fourneau granulé, du sulfate de calcium et une petite quantité de chaux, de ciment ou de clinker de ciment ; il est appelé ainsi parce que son contenu en sulfate équivalent est supérieur à celui du ciment Portland avec du laitier de haut-fourneau.

clinker – *clinker* (parfois *breeze*) – produit d'un fourneau partiellement fondu, qui est ensuite broyé pour fabriquer du ciment ; également, autres matériaux vitrifiés ou calcinés.

dolomite – *dolomite* – minéral qui possède une structure cristalline particulière et qui est composé de carbonate de calcium et de carbonate de magnésium en quantités chimiquement équivalentes – respectivement 54,27 % et 45,73 % ; roche dont le composant principal est la dolomite.

laitier de haut-fourneau – *blast-furnace slag* – produit non métallique, composé essentiellement de silicates, d'aluminosilicates de calcium et d'autres bases, qui se forment simultanément lors de la fusion du minerai de fer dans un haut-fourneau.

- 1.- *laitier refroidi à l'air (air-cooled blastfurnace slag)* : c'est le matériau résultant de la solidification des scories fondues à l'air libre ; le refroidissement qui suit peut être accéléré en versant de l'eau sur la surface solidifiée.
- 2.- *laitier expansé (expanded blastfurnace slag)* : c'est le matériau cellulaire léger obtenu grâce à un procédé contrôlé de refroidissement des scories fondues avec de l'eau, ou avec de l'eau et d'autres agents, comme de la vapeur ou de l'air comprimé, ou les deux.
- 3.- *laitier granulé (granulated blastfurnace slag)* : c'est le matériau granulé, vitreux, qui se forme lorsque les scories fondues sont rapidement refroidies, par exemple par immersion dans l'eau.

fonte – *melt* – portion de la masse de matière première qui est fondue pendant la cuisson du clinker de ciment, la calcination de granulats légers ou l'expansion du laitier de haut-fourneau.

four à ciment – *cement kiln* – four dans lequel le mélange de cru est séché et dosé, calciné et cuit pour obtenir du clinker, à des températures comprises entre 2 600 et 3 000 °F (soit entre 1 420 et 1 650 °C) ; il peut être de type rotatif, cubilot, à lit fluidisé ou à grille mobile ; le combustible peut être du charbon, du pétrole ou du gaz.

indice d'activité pouzzolanique – *pozzolanicactivity index* – indice qui mesure l'activité pouzzolanique, en se basant sur la résistance des mélanges cimentaires qui contiennent du ciment hydraulique avec et sans pouzzolane, ou qui contiennent de la pouzzolane et de la chaux.

retardateur – *retarding admixture* – ingrédient qui diminue la vitesse d'hydratation du ciment hydraulique et qui prolonge le temps de prise.

broyage final – *finish grinding* – broyage final du clinker pour l'obtention du ciment, généralement avec l'ajout de sulfate de calcium sous la forme de plâtre ou d'anhydrite.

broyeur à boulets – *ball mill / tube mill* – broyeur rotatif horizontal, cylindrique, dans lequel des boulets sont utilisés comme agents de broyage.

broyeur à cylindres – *roller mill* – broyeur horizontal ou vertical, dans lequel la matière première est broyée grâce à la pression exercée par des cylindres rotatifs.

NSP- *New suspension preheater*- préchauffeur à cyclones avec précalcinateur.

lait – *slurry* – mélange d'eau et de tout autre matériau insoluble finement divisé, comme le ciment Portland, les scories ou l'argile, en suspension.

PC – *precalciner* – précalcinateur.

périclase – *periclase* – minéral cristallin MgO, dont l'équivalent peut être présent dans le clinker de ciment Portland, le ciment Portland et les autres matériaux comme le laitier de fourneau Siemens Martin, et certains réfractaires basiques.

ardoise – *slate* – roche métamorphique à grain fin qui possède un clivage bien développé (clivage schisteux), généralement non parallèle aux plans de stratification de la roche.

pouzzolane – *pozzolan* – matériau siliceux ou siliceux et alumineux, qui possède en lui-même une valeur cimentaire faible mais qui, sous une forme finement divisée et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium aux températures habituelles, en formant des composés qui possèdent des propriétés cimentaires.

pouzzolane naturelle – *natural pozzolan* – matériau naturel sans traitement ou calcination qui possède des propriétés pouzzolaniques (par exemple les cendres volcaniques ou la pierre ponce, le chert opalin et schisteux, le tuf et certaines terres à diatomite).

pouzzolanique – *pozzolanic* – propre à une pouzzolane ou associé à une pouzzolane.

roche calcaire pour la fabrication de ciment – *cement rock* – calcaire naturel impur qui contient les ingrédients pour la fabrication du ciment Portland, approximativement dans les proportions requises.

SF et NSF – *suspension furnace / new suspension furnace* – fourneau en suspension / nouveau fourneau en suspension. Il s'agit de deux versions de fourneau successives, qui se différencient par la position des brûleurs et l'introduction du matériau dans le foyer.

silicate dicalcique – *dicalcium silicate* – composé, dont la composition $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ est abrégée en C2S ; l'une de ses formes impures (bélite) est présente dans le clinker de ciment Portland.

silicate tricalcique – *tricalcium silicate* – composé, dont la composition chimique $3\text{CaO}\cdot\text{Si}_2\text{O}_3$ est abrégée en C3S ; l'une de ses formes impures est un composant principal du ciment Portland.

SP – *Suspension preheater* – préchauffeur à cyclones.

plâtre – *gypsum* – minéral dont la composition est le sulfate de calcium dihydraté ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

8. BIBLIOGRAPHIE

Estudio y resultados de la participación del Sector Cementero Español en el Inventario Nacional de Dioxinas y Furanos (2000-2003). Année 2005.

Stacker and reclaimers systems. FLSmith. Materials Handling. Année 2005.

The Global Cement Report (6^e édition). Année 2005.

Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, version finale 2005. IPCC. The Intergovernmental Panel on Climate Change. Année 2005.

Industrial Competitiveness under the European Union Emissions Trading Scheme. IEA. International Energy Agency. Février 2005.

Directrices sobre Mejores Técnicas Disponibles y orientación provisoria sobre Mejores Prácticas Ambientales según el Artículo 5 y el Anexo C del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes [Avant-projet]. Décembre 2004.

Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making. An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers. Janvier 2004.

Projet de substitution dans le ciment d'une partie de clinker par les cendres volantes des centrales thermiques. Cement Industry Federation. Janvier 2004.

Cement Manufacture and the Environment. Hendrik G. van Oss et Amy C. Padovani. Année 2003.

Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de fabricación de cemento. Ministerio de Medio Ambiente. Année 2003.

Energy consumption and CO₂ emissions from the world cement industry. Institute for prospective Technological studies. Juin 2003.

Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology (4^e édition). Vol 5. Année 2002.

Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). [BREF, 2001]. Décembre 2001.

Environmental Impact Assessment Guidelines for Cement Manufacturing Plants. Egyptian Environmental Affairs Agency, EEAA. Février 2001.

Experience with the OK Roller Miller. IFC International Finance Corporation. World Bank Group. Asian cement and construction materials magazine. Année 2000.

Fours de cimenterie. Ateliers de cuisson du clinker. Année 2000.

NO_x Control Technologies for the Cement Industry. Rapport final. Septembre 2000.

Evaluating Clean Development Mechanism Projects in the Cement Industry Using a Process-Step Benchmarking Approach. Juillet 2000.

Emission Reduction of Greenhouse Gases from the Cement Industry. C.A. Hendriks¹, E Worrell², D. de Jager¹, K. Blok¹ et P. Riemer³ 1ECOFYS, P.O Box 8408, NL-3503 RK Utrecht, Pays-Bas ; 2Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, Californie, USA ; 3IEA Greenhouse Gas R&D Programme, Cheltenham, Royaume-Uni. Année 1998.

The Netherlands Dutch Notes on BAT for the Production of Cement Clinker. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment. Année 1997.

Industrial Experience with Clinker Grinding in the Horomill. Marchal, G. Proc. 1997 IEEE/PCA Cement Industry Technical Conference XXXIX Conference Record, Institute of Electrical and Electronics Engineers : New Jersey. Année 1997.

Die Horomill® - Eine Neue Mühle für die Feinzerkleinerung. Buzzi, S., 1997. ZKG International 3 50 pp. 127-138. Année 1997.

Prevention and abatement of NOx emissions. Cement and Lime Manufacturing Industries 101 [Int. Cem. Rev. Oct 97] British Cement Association. International Cement Review, p. 51-59. Octobre 1997.

Current state of NOx abatement in the cement industry. W. Billhardt, K. Kuhlmann, W. Ruhland, M. Schneider, H. Xeller. ZKG International, Volume 49, N° 10, p. 545-560. Année 1996.

Industrial Energy End-Use Analysis and Conservation Potential in Six Major Industries in Canada. Jaccard, M.K. & Associates et Willis Energy Services Ltd. Rapport préparé pour Natural Resources Canada, Ottawa, Canada. Année 1996.

International Comparison of Energy Efficiency Improvement in the Cement Industry, Proceedings ACEEE 1995 Summer Study on Energy Efficiency in Industry (Volume II). Worrell, E., R. Smit, D. Phylipsen, K. Blok, F. van der Vleuten et J. Jansen. Année 1995.

Cement in Development: Energy and Environment. Vleuten, F.P. van der. Netherlands Energy Research Foundation, Petten, Pays-Bas. Année 1994.

Optimization of Clinker Cooler Operation. Buzzi, S. et G. Sassone. Proc. VDZ Kongress 1993: « Verfahrenstechnik der Zementherstellung », Bauverlag, Wiesbaden, Allemagne (pp. 296-304). Année 1993.

Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada. Holderbank Consulting. CANMET, Ottawa, Ontario, Canada. Année 1993.

SNCR technology for NOx reduction in the cement industry. D. Kupper, L. Brenttrup – Krupp Polysius, Germany. World Cement. Mars 1992.

Energy Technology in the Cement Industrial Sector. COWIconsult, March Consulting Group et MAIN, 1993. Rapport préparé pour CEC - DG-XVII, Bruxelles. Avril 1992.

Energy Savings in Cement Kiln Systems. Birch, E. Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis), Londres, Angleterre : Elsevier Applied Science (pp. 118-128). Année 1990.

Energy Saving by Utilisation of High Efficiency Classifier for Grinding and Cooling of Cement on Two Mills at Castle Cement (Ribblesdale) Limited, Clitheroe, Lancashire, UK. Parkes, F.F. Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis), Londres, Angleterre : Elsevier Applied Science. Année 1990.

The Rotary Cement Kiln. Chemical Publishing Company. Année 1986.

CEMBUREAU (association européenne du ciment)

Activity Report 2004 - Rapport d'Activité. Année 2004.

World Cement Directory. Année 2002.

« *Best Available Techniques* » for the Cement Industry. Mars 2000.

Environmental Benefits of using Alternative Fuels in Cement Production - A Life-Cycle Approach. Février 1999.

Climate Change, Cement and the EU. Juillet 1998.

A contribution from the European Cement Industry to the exchange of information and preparation of the IPPC BAT Reference Document for the cement industry. Rapport Cembureau, 1997.

Alternative Fuels in Cement Manufacture - Technical and Environmental Review. Avril 1997.

Cemento Hormigón (revue technique)

Aprovechamiento energético de neumáticos usados en la industria cementera europea. Septiembre 2005.

Reducción de las emisiones de NO_x en la industria. Décembre 2004.

Instalación para recuperación de polvos de electrofiltro de bypass de cloro mediante dilución y filtro prensa. Septiembre 2004.

Transformación del electrofiltro de horno a filtro híbrido en Gádor. Mai 2004.

Experiencia de la industria del cemento francesa en el uso de combustibles alternativos. Avril 2004.

Evaluación de las tecnologías para la monitorización en continuo de partículas en chimenea. Mars 2004.

Estado de la Producción más Limpia en los países del Plan de Acción para el Mediterráneo. Centro de Actividad Regional para la Producción más Limpia CAR/PL. Janvier 2004.

Experiencias de funcionamiento industrial y optimización de diseño de quemador utilizando quemadores Rotaflam de bajo NO_x en hornos de cemento para combustion de petcoke. Novembre 2003.

Control de la emisión de SO₂ en hornos de cemento. Septiembre 2003.

Nueva tecnología para el control de emisiones: determinación de la composición de las partículas emitidas en la producción de clínker. Juin 2003.

Tramitación de la autorización ambiental de la fábrica de Alcanar y cantera adyacente. Mai 2003.

Primera evaluación de las emisiones de PCDD/FS a la atmósfera procedentes de la fabricación de cemento en España. Novembre 2002.

Prevención y control integrados de la contaminación y mejores técnicas disponibles (II). Septiembre 2002.

Prevención y control integrados de la contaminación y mejores técnicas disponibles (I). Juillet 2002.

Evaluación de la situación ambiental de la producción de clínker mediante la aplicación del análisis del ciclo de vida. Mai 2002.

Cemento y Desarrollo Sostenible. Janvier 2002.

Eliminación de NO_x con el proceso SNCR en instalaciones de horno con combustión escalonada. Janvier 2002.

WBCSD (World Business Council for Sustainable Development)

- *The Cement CO₂ Protocol: CO₂ Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry.* Juillet 2005.
- *The Cement Sustainability Initiative: Progress report.* Juin 2005.
- *Toward a Sustainable Cement Industry.* Mars 2002.

CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center)

- *Fiscal Year 2003 Annual Report.*
- *FY Annual Reports for CDIAC and the WDC for Atmospheric Trace Gases (1997 - 2003).*
- *National Cement Production Estimates: 1950 - 2002.*

LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory)

Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making. An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers. Ernst Worrell et Christina Galitsky. Environmental Energy Technologies Division sponsorisée par U.S. Environmental Protection Agency. Janvier 2004.

Evaluating Clean Development Mechanism Projects in the Cement Industry Using a Process-Step Benchmarking Approach. Michael Ruth, Ernst Worrell et Lynn Price. Environmental Energy Technologies Division. Juillet 2000.

UNIDO (United Nations Industrial Development Organization)

Output of a Seminar on Energy Conservation in Cement Industry. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). Année 1994.

Capacity-building for private sector development in Africa. Richard M. Kennedy.

Private Sector Development Branch Investment Promotion and Institutional Capacity Building Division.

SITES INTERNET

AITEC. Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento. www.aitecweb.com

American Concrete Institute. www.aci-int.org

CAR/PL. Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia. www.cema-sa.org

CEEBIC. Central Eastern Europe Business Information Center. www.mac.doc.gov/ceebic

Ciment Català. www.ciment-catala.org

Commission européenne « Énergie ». http://europa.eu.int/comm/energy/index_en.html

Hellenic Cement Industry Association. www.hcia.gr

Oficemen. Agrupación de Fabricantes de Cemento de España. www.oficemen.com

SFIC. Syndicat Français de l'Industrie Cimentière. www.infociments.fr

TÇMB. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği. www.tcma.org.tr

LEAN

ion



**Centre d'activités régionales
pour la production propre (CAR/PP)**

Dr. Roux, 80 – 08017 Barcelone (Espagne)

Tél. : + 34 93 553 87 90 - Fax : + 34 93 553 87 95

Courriel : cleanpro@cprac.org

<http://www.cprac.org>



Imprimé su papier recyclé à 100 % et sans chlore