

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université Abou bekr Belkaid – Tlemcen**  
**Faculté de Technologie**  
**Département de Génie Electrique et Electronique**



**Mémoire pour l'obtention du diplôme de :**

**Master en Génie industriel**  
**Option : Ingénierie des systèmes**

**Thème :**

**Contribution à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>**  
**et de la consommation énergétique dans l'industrie**  
**cimentaire par l'amélioration d'un système de production :**  
**Cas de la cimenterie de Béni-Saf**

**Présenté par :**

Mohammed Rafiq      KADRI  
Soumia                      ROUIGUEB  
Hadjer Abir              CHIKH

**Soutenu le 29 juin 2017 à Tlemcen devant le jury composé de :**

<b>Présidente :</b>	Lamia SARI	MCA	Université de Tlemcen, Algérie
<b>Examineurs :</b>	Mohammed El Amine ZENASNI	MCA	Université de Tlemcen, Algérie
<b>Examineurs :</b>	Yassir BENSMAINE	Doctorant	Université de Tlemcen, Algérie
<b>Encadreurs :</b>	Fayçal BELKAID	MCA	Université de Tlemcen, Algérie
<b>Co-encadreur :</b>	Zine El Abidine KAMECHE	MCB	Centre universitaire de Témouchent

**Année Universitaire : 2016/2017**

# REMERCIEMENTS

*Nos remerciements vont tout premièrement à dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a données durant ces années d'étude afin que nous puissions arriver à ce stade.*

*Nos remerciements s'adressent ensuite aux membres du jury qui nous fait l'honneur de participer à notre soutenance.*

*Nous remercions sincèrement Dr. Kameche Zine El-Abidine et Dr. Belkaid Fayçal pour avoir acceptés d'évaluer nos travaux et aussi pour leur encadrements et leur précieux conseils.*

*Nos remerciements s'adressent également à Mm Lamia SARI, Mr Mohammed El Amine ZENASNI et Mr Yassir BENSMAINE pour leur participation au jury en tant qu'examineurs.*

*Nous tenons à remercier toute l'équipe pédagogique du laboratoire MELT (Manufacturing Engineering Laboratory of Tlemcen.) et les responsables et enseignants de la formation Génie Industriel pour avoir assuré le bon déroulement des cours et pour leurs effort pendant les cinq ans de formation.*

*Nous remercions également, et sans exception, l'ensemble des opérateurs et des ingénieurs de la Société des Ciments de Béni Saf.*

*Nous ne pouvons terminer sans avoir une pensée pour nos familles. Sans eux, nous n'aurions jamais pu arriver jusque là et atteindre nos objectifs. Un grand merci pour leur soutien indéterminé.*

*Nous remercions énormément nos amies, pour l'encouragement incroyable de leur part.*

*Un grand merci pour tous et cette thèse leurs est dédiée. Tous ce qu'ont loin de nous, mais nous aident avec les prières et les souhaits de succès dans cette thèse et dans toute notre vie.*

## Sommaire

<i>REMERCIEMENTS</i> .....	2
Liste des figures .....	7
Liste des tableaux .....	10
Liste des abréviations .....	11
Résumé .....	16
Problématique .....	17
Introduction générale .....	19
I.1. Introduction .....	22
I.2. Le matériau ciment .....	23
I.2.1. Définition .....	23
I.2.2. Un peu d'histoire.....	23
I.2.3. Différents processus de fabrication du ciment.....	24
I.2.3.1. La voie sèche .....	24
I.2.3.2. Autres techniques de préparation de la matière.....	24
I.2.4. La fabrication du ciment .....	25
I.2.4.1. Les matières premières.....	25
I.2.4.2. Différentes étapes de la fabrication du ciment par voie sèche .....	26
I.3. Quelques statistique sur la fabrication du ciment.....	33
I.3.1. Le marché mondial du ciment .....	33
I.3.2. Le marché national de ciment .....	38
I.4. Conclusion.....	41
II.1. Introduction .....	43
II.2. Les émissions atmosphériques dans l'industrie du ciment .....	43
II.2.1. Introduction .....	43
II.2.2. Les gaz d'échappement .....	44
II.2.2.1. Les émissions de l'Oxydes d'Azote (NO <sub>x</sub> ).....	44
II.2.2.2. Les émissions de Dioxydes de Soufre (SO <sub>2</sub> ) .....	45
II.2.2.3. Les émissions de Dioxyde de Carbone (CO <sub>2</sub> ) .....	46
II.2.2.4. Les émissions de Dioxines et Furannes.....	48
II.2.2.5. Les émissions de HCl .....	48
II.2.3. Les matières particulaires .....	48
II.2.4. Les émissions de poussières .....	50

II.2.5. Les émissions de métaux lourds et autres polluants atmosphériques.....	51
II.2.6. Les émissions à la cheminée .....	53
II.3. Consommation énergétique .....	54
II.3.1. Introduction .....	54
II.3.2. Les besoins calorifiques .....	55
II.3.3. Les besoins électriques .....	56
II.3.4. Les sources d'économie d'énergie.....	58
II.4. La valorisation énergétique .....	59
II.4.1. Comment les déchets sont-ils utilisés pour produire du ciment ? .....	59
II.4.2. Quel traitement est le moins nocif pour l'environnement ? .....	59
II.4.3. Utilisation des ressources et production de déchets .....	60
II.5. Conclusion.....	62
III.1. Introduction .....	65
III.2. Présentation de la cimenterie de Béni-Saf .....	65
III.2.1. L'histoire de la Cimenterie.....	65
III.2.2. Les différents services de production à la SCIBS.....	66
III.2.2.1. Sous-direction exploitation.....	67
III.2.2.2. Sous-direction maintenance .....	67
III.2.3. La capacité de production.....	70
III.3. La fabrication du ciment a la SCIBS.....	72
III.3.1. Le ciment produit.....	72
III.3.2. Les composantes chimiques et minéralogiques du ciment de Béni Saf .....	72
III.3.3. Processus de fabrication du ciment à la SCIBS .....	72
III.3.3.1. Extraction de la matière première.....	73
III.3.3.2. Préparation du cru (concassage et pré-homogénéisation) .....	74
III.3.3.3. Broyage du cru.....	75
III.3.3.4. Homogénéisation.....	76
III.3.3.5. Cuisson.....	77
III.3.3.6. Stockage du clinker .....	80
III.3.3.7. Broyage du ciment .....	81
III.3.3.8. Stockage, ensachage et expédition.....	81
III.4. Problèmes écologique et économique dans la cimenterie de Béni Saf .....	84
III.4.1. Problème écologique.....	84

III.4.1.1. Types de polluants rejetés dans l’atmosphère .....	84
III.4.1.2. Les menaces écologiques de la cimenterie de Béni Saf.....	85
III.4.2. Problème économique .....	86
III.5. Conclusion.....	86
IV.1. Introduction.....	89
IV.2. Utilisation des batteries de condensateurs.....	90
IV.2.1. Définition .....	90
IV.2.2. But de l'utilisation des batteries de condensateurs.....	90
IV.2.3. Energies active, réactive, apparente (définitions et rappel) .....	91
IV.2.4. Compensation de l’énergie réactive.....	92
IV.2.5. Réduction de la puissance apparente absorbée (la compensation) .....	93
IV.2.6. Types de compensation.....	94
IV.2.7. Exemple de calcul de puissance de batterie à installer.....	96
IV.2.8. Conclusion .....	97
IV.3. Valorisation énergétique des déchets en cimenterie.....	97
IV.3.1. Introduction.....	97
IV.3.2. Les combustibles de substitution (Combustibles issus de déchets).....	98
IV.3.3. Consommation d’énergie et de combustibles .....	99
IV.3.4. Comment utiliser les déchets pour produire du ciment ?.....	100
IV.3.5. Comment incinérer les déchets industriels ? .....	101
IV.3.6. Protocole de contrôle, sécurité et qualité.....	103
IV.3.7. Les avantages de la valorisation énergétique des déchets .....	103
IV.3.8. Conclusion .....	104
IV.4. Blade Compressor (Compresseur à lame) .....	105
IV.4.1. Introduction.....	105
IV.4.2. Définition d’un compresseur .....	105
IV.4.3. Compresseur à piston.....	105
IV.4.4. Transport pneumatique dans la cimenterie de Béni Saf .....	106
IV.4.5. La nouvelle technologie pour remplacer le compresseur à piston .....	108
IV.4.5.1. Définition d’un compresseur à lame .....	108
IV.4.5.2. Une nouvelle prise sur un vieux problème.....	108
IV.4.5.3. Principe de fonctionnement.....	109
IV.4.5.4. Comment le compresseur à lame pourrait révolutionner l'industrie du.....	111

ciment ? .....	111
IV.4.6. Conclusion .....	111
IV.5. L'estimation possible de consommation d'énergie .....	112
IV.5.1. la méthode des moindres carrés .....	112
IV.5.2. la méthode de rapport mobile .....	115
IV.5.3. Comparaison entre les deux méthodes.....	117
IV.6. Réduction des émissions de poussières canalisées à l'aide des installations de dépoussiérage.....	118
IV.6.1. Utilisation des filtres électrostatiques.....	118
IV.6.2. Utilisation des filtres à manches.....	119
IV.6.2.1. Les performances des filtres à manche .....	120
IV.7. Conclusion .....	121
Conclusions et Perspectives .....	122
Références bibliographiques .....	125
Annexe A.....	129
A.1 S'inspirer du corps humain pour capturer le CO <sub>2</sub> à grande échelle.....	129
A.1.1 introduction .....	129
A.1.2. Principe de fonctionnement.....	129
A.1.3. Les avantages de l'enzyme 1T1 .....	131
A.1.4. Une fois le CO <sub>2</sub> capturé, comment s'en débarrasser ?.....	131
A.1.5. Conclusion .....	132

# Liste des figures

<b>Fig. I.1.</b>	Processus de fabrication du ciment	24
<b>Fig. I.2.</b>	Schéma indiquant le processus pour l'obtention du clinker	28
<b>Fig. I.3.</b>	Four horizontal rotatif cylindrique en acier	29
<b>Fig. I.4.</b>	Granulés de clinker prêt à être broyé	30
<b>Fig. I.5.</b>	Int Intérieur d'un broyeur à boulets	31
<b>Fig. I.6.</b>	<i>Le processus de fabrication ainsi les compositions dans chaque étape</i>	32
<b>Fig. I.7.</b>	<i>jusqu'à l'obtention produit fini (Ciment)</i>	34
<b>Fig. I.8.</b>	Évolution du marché mondial du ciment	
	Consommation de ciment par habitant dans le monde (statistiques de l'année 2014 en kg)	37
<b>Fig. II.1.</b>		44
<b>Fig. II.2.</b>	Émissions de NO <sub>x</sub> ramenées à la tonne de clinker produite	46
<b>Fig. II.3.</b>	Répartition des émissions de CO <sub>2</sub> du secteur cimentier	50
<b>Fig. II.4.</b>	Émissions de poussières ramenées à la tonne de clinker produite	53
<b>Fig. II.5.</b>	Synthèse des émissions aux cheminées en 2004	54
<b>Fig. II.6.</b>	Synthèse des émissions aux cheminées en 2005	58
<b>Fig. III.1</b>	Répartition de la demande en électricité dans le procédé industriel cimentier	66
<b>Fig.III.2.</b>	Réseau de distribution de la SCIBS	69
<b>Fig.III.3.</b>	Organigramme de l'entreprise	
<b>Fig.III.4</b>	les statistiques de fabrication du clinker, du ciment, ainsi que d'expédition du ciment dans la cimenterie de BENI SAF	71
<b>Fig.III.5.</b>	Dispositif général de l'usine	73
<b>Fig.III.6</b>	Extraction les engins dans la carrière de Béni-Saf	74

<b>Fig.III.7.</b>	Concassage des matières premières	74
<b>Fig.III.8.</b>	hall de pré-homogénéisation	75
<b>Fig.III.9.</b>	Stacker	75
<b>Fig.III.10.</b>	Broyage du cru (Cimenterie de Béni Saf)	76
<b>Fig.III.11.</b>	Silos d'homogénéisation (Cimenterie de Béni Saf)	77
<b>Fig.III.12</b>	Four rotatif à la cimenterie de Béni Saf	77
<b>Fig.III.13</b>	Préchauffeur (Cimenterie de Béni Saf)	78
<b>Fig.III.14.</b>	Four rotatif (Cimenterie de Béni Saf)	79
<b>Fig.III.15</b>	Schéma d'un four rotatif	79
<b>Fig.III.16.</b>	Refroidisseur (Cimenterie de Béni Saf)	80
<b>Fig.III.17.</b>	Les bulles de stockage du clinker (Cimenterie de Béni Saf)	80
<b>Fig.III.18.</b>	Broyeur à ciment à la cimenterie de Béni Saf	81
<b>Fig.III.19.</b>	Silos de stockage de ciment (Cimenterie de Béni Saf)	82
<b>Fig.III.20.</b>	Schéma indiquant l'Abattage, Concassage et transport des matières premières (SCIBS)	82
<b>Fig.III.21.</b>	Schéma indiquant le broyage du cru et la cuisson de la farine cru (SCIBS)	83
<b>Fig.III.22.</b>	Schéma indiquant le broyage, le stockage et l'expédition du ciment (SCIBS)	83
<b>Fig.III.23.</b>	Emission atmosphérique de la cimenterie (SCIBS)	84
<b>Fig. IV.1.</b>	Filtre à manches (Cimenterie de Béni Saf)	85
<b>Fig. IV.2.</b>	Batterie de condensateurs	91
<b>Fig. IV.3.</b>	Composition vectorielle des Courant	92
<b>Fig. IV.4.</b>	Composition vectorielle des puissances	92
<b>Fig. IV.5.</b>	Circuit de l'installation en adjoignant une batterie de	93
<b>Fig. IV.6.</b>	condensateurs	94
<b>Fig. IV.7.</b>	Composition vectorielle des puissances avec l'augmentation de S	94
	Composition vectorielle des puissances expliquant le principe de	95



<b>Fig. IV.8.</b>	la compensation d'énergie réactive	95
<b>Fig. IV.9.</b>	Composition vectorielle des Courant après la compensation	96
<b>Fig. IV.10.</b>	Schéma représentant la compensation Locale	103
<b>Fig. IV.11.</b>	Schéma représentant l'emplacement des résistances de	105
<b>Fig. IV.12.</b>	décharges	107
<b>Fig. IV.13.</b>	Incinérateur à four rotatif	108
<b>Fig. IV.14.</b>	Co-incinération en cimenterie	110
<b>Fig. IV.15.</b>	schéma d'un compresseur d'air à piston	111
<b>Fig. IV.16.</b>	Compresseur 2,5 bar ATLAS utilisé dans SCIBS	115
<b>Fig. IV.17.</b>	Le design du nouveau compresseur (compresseur à lame)	118
<b>Fig. IV.18.</b>	Le fonctionnement du compresseur à lame	121
<b>Fig. IV.19.</b>	Consommation d'énergie pendant six années	122
	Graphique des consommations avec variations saisonnières	122
<b>Fig. A.1.</b>	Exemple de filtre à manches et de matière filtrante utilisés dans une cimenterie du Royaume-Uni	131
<b>Fig. A.2.</b>	Montage du nouveau filtre à manche	131
	Le processus de solutions de CO2 pour la capture de CO2 avec ses enzymes biologiques exclusives	
	Laboratoires de CO2 Solution à Québec	

# Liste des tableaux

<b>Tab. I.1</b>	Constituant principaux du clinker	30
<b>Tab. I.2.</b>	Classement des 18 plus grands producteurs mondiaux	35
<b>Tab. I.3.</b>	Production de ciment dans le monde en millions de tonnes	36
<b>Tab. II.1</b>	niveau des émissions atmosphériques pour la fabrication du ciment	52
<b>Tab. II.2.</b>	Consommation énergétique moyenne des procédés cimentiers	55
<b>Tab. II.3.</b>	Consommation énergétique du cru et du ciment	57
<b>Tab. II.4.</b>	consommation de ressources et d'électricité	61
<b>Tab. II.5.</b>	Volume d'émission et de production de déchets	61
<b>Tab. II.6.</b>	Consommation de chaleur et capacité de production pour les fours de fabrication du ciment	62
<b>Tab.III.1.</b>	Historique Production/Expédition du ciment depuis 1978	70
<b>Tab. IV.1.</b>	Les valeurs de $\cos \varphi$ correspondantes au $T_g \varphi$	97
<b>Tab. IV.2.</b>	les valeurs de la facture de consommation d'énergie mensuelle et annuelle	113
<b>Tab. IV.3.</b>	les différentes étapes de la méthode des moindres carrées	114
<b>Tab. IV.4.</b>	l'estimation des factures de consommation d'énergie pendant l'année 2016	116
<b>Tab. IV.5.</b>	le calcul des coefficients saisonniers pour chaque mois de l'année 2016	117
<b>Tab. IV.6.</b>	la consommation d'énergie estimée pour l'année 2017	117

# Liste des abréviations

**APW** : Assemblé Populaire de Wilaya

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** : d'alumine

**As**: Arsenic

**BP** : basse pression

**CaCO<sub>3</sub>** : carbonate de calcium

**CaO**: chaux

**CO<sub>2</sub>** : Dioxyde de Carbone

**Ca<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>10</sub>** : Alumino-ferrite tétracalcique

**Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>** : Aluminate tricalcique

**Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>** : Bélite (silicate bicalcique)

**Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>** : Alite (silicate tricalcique)

**Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>** : Aluminate tricalcique

**Ca<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>10</sub>** : Aluminoferrite tétracalcique

**CNI** : Conseil National d'Investissement

**Ca(OH)<sub>2</sub>** : la chaux hydratée

**CO** : monoxyde de carbone

**°C** : degré Celsius

**Cd**: Cadmium

**Cr**: Chrome

**Co**: Cobalt

**Cu** : Cuivre

**C.M.R** : contrôle, mesure et régulation

**C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S**: silicates de calcium

**C<sub>3</sub>A**: silicates d'aluminium

**C<sub>4</sub>AF** : silicates de fer

**cm<sup>3</sup>** : centimètre cube

**CA** : l'Anhydrase Carbonique

**DA** : dinar algérien

**DRH** : Direction des Ressources Humains

**DFC** : Direction de Finance et Comptabilité

**ETRHB** : Entreprise des Travaux Routiers, Hydraulique et Bâtiments

**ERCO** : Entreprises régionales des Ciments pour l'ouest

**ECDE** : Entreprises des Ciments et dérivés pour Echlef

**ERCC** : Entreprises régionales des Ciments pour centre

**ERCE** : Entreprises régionales des Ciments pour l'est

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** : d'oxyde ferrique

**FCE** : Forum des chefs d'entreprise

**GICA** : Groupe Industriel du Ciment en Algérie

**GJ**: giga joule

**GIC** : GROUPE Industriel et Commercial

**GWh** : gigawatt-heure

**GCal** : giga calorie

**Hg** : Le Mercure

**HP** : haute pression

**h** : heure

**HCl** : chlorure d'hydrogène

**It** : Le courant apparent

**Ia** : Le courant actif

**Ir** : Le courant réactif

**Kg** : kilogramme

**K**: Kelvin

**K Pa**: kilopascal

**kJ**: kilojoule

**KWh**: kilowatt-heure

**kVAR** : kilovolts ampères réactive

**KW** : kilowatt

**KVA** : kilovoltampère

**Mdt** : millions de tonnes

**m<sup>3</sup>** : mètre cube

**mg** : milligramme

**MP** : matières particulaires

**Mn** : Manganèse

**Nm<sup>3</sup>** : Normal Mètre Cube

**mm** : millimètre

**m** : mètre

**NO<sub>x</sub>** : l'Oxydes d'Azote

**NO** : le monoxyde d'azote

**NO<sub>2</sub>** : le dioxyde d'azote

**N<sub>2</sub>** : l'Azote de l'air

**Ni**: Nickel

**Nm<sup>3</sup>** : normal mètre cube

**PES** : précipitateurs électrostatiques

**Pb**: plomb

**PDG** : Président- directeur générale

**P** : puissance active

**Q** : puissance réactive

**SiO<sub>2</sub>**: silice

**SO<sub>2</sub>** : Dioxydes *de Soufre*

**Sb**: antimoine

**SNMC** : la Société Nationale des Matériaux de Construction

**SPA** : Société Par Action

**S.CI.BS** : Société des Ciments de Béni-Saf

**S** : puissance apparente

**Tl**: le Thallium

**TWh**: térawatt-heure

**t** : tonne

**VLE** : valeurs limites d'émissions"

**V:** Vanadium

**% :** pourcentage

**$\varphi$ :** Déphasage entre S et P

## Résumé

Les questions environnementales liées aux projets de fabrication de ciment portent principalement sur deux aspects: les émissions atmosphériques et la consommation d'énergie et combustibles. En effet, l'industrie cimentière est très émettrices des gaz à effet de serre (principalement le CO<sub>2</sub>), ce qui a un impact néfaste sur l'environnement, et aussi très consommatrice de l'énergie électrique et calorifique, ce qui peut influencer sur le prix du ciment. L'objectif de ce travail de recherche est de trouver les meilleurs solutions pour la cimenterie de Béni-Saf, objet de cette étude, afin de pouvoir minimiser de la consommation énergétique et les émissions des gaz et des polluants. Un gain économique très significatif pourra être enregistré par l'adoption des systèmes proposées dans cette étude pour la cimenterie de Béni-Saf, tels que l'utilisation des batteries de condensations, des compresseurs à lame (Blade Compressor), la valorisation énergétique des déchets, l'installation des filtres à manches,...etc.

**Mots clés:** *Industrie cimentière, Émissions atmosphériques, Consommation d'énergie, Valorisation des déchets, Système de dépoussiérage.*

## Abstract

Environmental issues related to cement manufacturing projects focus mainly on two aspects: Atmospheric emissions and energy and fuel consumption. Indeed, the cement industry is highly emitting greenhouse gases (mainly the CO<sub>2</sub>), which has a harmful impact on the environment, and it is also very consuming of the electrical and calorific energy, which can influence The price of cement. The objective of this research is to find the best solutions for the Beni-Saf cement factory, object of this study, in order to minimize energy consumption and emissions of gases and pollutants. A very significant economic gain can be recorded by adopting the systems proposed in this study for the Beni-Saf cement factory, such as the use of condensing batteries, blade compressors, energy recovery from waste, Installation of sleeve filters, etc.

**Key words:** *Cement industry, Atmospheric emissions, Energy consumption, Waste recovery, Dust removal syst.*

## الملخص

تركز القضايا البيئية ذات الصلة لتعزيز المشاريع الانتاجية على جانبين:

الانبعاثات في الغلاف الجوي واستهلاك الطاقة والوقود. والواقع أن صناعة الاسمنت وانبعاث الغازات المسببة للاحتباس (، التي لها تأثير ضار على البيئة والمستهلك أيضا جدا من الطاقة الكهربائية والحرارة، CO<sub>2</sub> الحراري جدا (في المقام الأول والتي يمكن أن تؤثر على أسعار الأسمنت. والهدف من هذا البحث هو إيجاد أفضل الحلول لمصنع أسمنت بني ساف في هذه الدراسة، وذلك للحد من استهلاك الطاقة وانبعاثات الغازات والملوثات. سيتم تسجيله مكاسب اقتصادية كبيرة جدا من خلال اعتماد أنظمة المقترحة في هذه الدراسة لمصنع الاسمنت من بني صاف، مثل استخدام بطارية منشفة، وضواغط شفرة (ضاغط بليد)، استعادة الطاقة من النفايات ، وتركيب فلتر حقيبة ... إلخ

**كلمات البحث:** *صناعة الاسمنت، وانبعاثات الهواء واستهلاك الطاقة، وتقييم النفايات، نظام الغبار*



# Problématique

---

Les activités des entreprises industrielles ont un impact considérable sur l'environnement. Car, elles représentent une source majeure de prélèvement de ressources naturelles et de rejets dans l'environnement. Alors, de nos jours, de nombreuses entreprises ont conscience que leur implication dans la protection et la préservation des ressources naturelles conditionne leur survie à long terme. Donc, il est devenu nécessaire de minimiser l'impact sur l'environnement par les entreprises qui s'engagent dans une démarche de développement durable.

Une des activités industrielles la plus pratiquée dans les différents pays du monde est l'industrie du ciment. Car, dans ce dernier siècle, ce matériau (liant hydraulique) est devenu le produit chimique le plus utilisé dans le domaine de la construction sur notre planète terre. C'est le matériau du XXe siècle, matériau centenaire. Ainsi, le XXe siècle a ouvert la voie aux développements des procédés de fabrication qui n'ont pas cessé de se perfectionner. Pour produire une tonne de clinker, constituant de base du ciment, il fallait 40 heures en 1870, actuellement, il faut environ 3 minutes seulement.

Tout au long du processus, la fabrication du ciment influe négativement sur l'environnement, principalement à travers l'émission de poussière polluante et de gaz nocifs et à effet de serre (principalement de fortes émissions de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère). Par ailleurs, les ciments sont obtenus à l'issue d'une transformation du calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ), sous l'effet de la chaleur, en chaux ( $\text{CaO}$ ) et en gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) (phénomène de décarbonatation). De plus, l'utilisation des sources d'énergie qui alimentent les fourneaux et les machines, produit aussi du  $\text{CO}_2$  à travers leur combustion. Actuellement, l'industrie de ciment produit environ 5 % des émissions artificielles de  $\text{CO}_2$  dans le monde, dont 60 % sont issues du volet chimique du processus de fabrication et 40 % de l'utilisation des ressources énergétiques. En termes de quantités, pour 1000 kg de ciment produit, il y a une émission de 900 kg de  $\text{CO}_2$ .

En effet, le développement dans l'industrie des ciments n'a pu s'effectuer que grâce à l'apparition de matériels nouveaux : fours rotatifs et broyeurs à boulets en particulier. Mais l'industrie du ciment est très polluante et consomme beaucoup d'énergie. Elle utilise des fours à haute température pour la fabrication du clinker (calcination à 1450 °C). Alors, une forte consommation de l'énergie est souvent enregistrée dans les cimenteries, non seulement pour la cuisson des matières premières mais aussi pour leur broyage.

Donc, les industries du ciment consomment une grande quantité d'énergie. Les coûts en matière d'énergie électrique et de combustible peuvent représenter entre 40 et 50 %

des coûts totaux de production. Les besoins en énergie des cimentiers sont connus aujourd'hui : il faut entre 3000 et 4200 MJ pour fabriquer une tonne de clinker en voie sèche auxquels s'ajoutent encore 324 à 468 kWh d'énergie électrique lors de la mouture du ciment. Ceci explique le souci permanent des cimentiers en matière d'amélioration de leur efficacité et ce afin de réduire la consommation d'énergie par tonne de ciment.

Parmi les principales cimenteries existantes en Algérie, la cimenterie de Béni-Saf qui se situe dans le nord ouest Algérien (wilaya de Aïn Témouchent). C'est l'une des plus performantes unités de production du ciment dans le pays en termes de capacité de production et qui couvre une bonne partie du territoire national. Depuis sa mise en service en 1979, la production annuelle de cette entreprise n'a cessé d'évoluer. Elle a passé de 438 183 tonnes de ciment en 1979 à 1 229 492 tonnes en 2016.

Cette cimenterie, comme plusieurs en Algérie, consomme une quantité importante en énergie électrique et calorifique et rejette dans l'atmosphère des gaz à effet de serre qui sont nocive pour l'environnement tel que le CO<sub>2</sub>.

Dans ce travail de recherche, nous avons étudié les solutions possibles qui peuvent être appliquées au niveau de la cimenterie de Béni Saf, afin de pouvoir, d'une part, minimiser de sa consommation actuelle en énergie, et d'autre part, réduire le taux de ses émissions de CO<sub>2</sub> qui ont un impact nocive sur l'environnement de la région.

# Introduction générale

---

Chaque seconde dans le monde, sont coulés 126 000 kilos de ciment (compteur), soit 3,4 milliards de tonnes par an (La production mondiale de ciment est estimée à 4 milliards de tonnes en 2013) [1]. En Algérie, à fin octobre 2016, le Groupe GICA (Groupe Industriel du Ciment en Algérie) a atteint une production de 10.175.315 tonnes de ciment contre 9.807.102 tonnes de ciment durant la même période de 2015, soit une évolution de 4 %. Pour l'année 2017, Il table sur une production de 13.200.000 tonnes de ciment.

Mais, puisque le processus cimentier est basé sur une cuisson de calcaire (décarbonatation) à très hautes températures, il est donc consommatrice d'énergie et émettrice de CO<sub>2</sub> connu sous le nom de gaz à effet de serre; La consommation spécifique est très variable d'une usine à l'autre (entre 3000 et 8000 kJ/tonne de consommation de clinker de calories, et entre 70 et 160 kW/tonne de ciment pour la consommation d'électricité) [2]. En effet, la consommation électrique dépend aussi de la qualité de l'ingénierie mise en œuvre pour la conception de la ligne de production (usine en "ligne" avec un nombre limité de transporteurs, transport par convoyeurs plutôt que pneumatique, ...etc.).

L'objectif de notre travail est de contribuer à l'étude de la réduction en consommation d'énergie et en émission du gaz carbonique dans l'atmosphère. Alors, nous avons étudié le cas de la cimenterie de Béni Saf et des solutions ont été donc proposées pour cette usine.

Alors, dans une première partie de notre travail, une synthèse bibliographique est présentée en deux chapitres. Dans un premier, des notions et définitions générales sur le matériau ciment sont données, ainsi que les différents processus et étapes de fabrication du ciment (principalement par voie sèche), sont détaillées. Des statistiques concernant la production du ciment au niveau national et mondial représentent aussi une partie de ce chapitre.

Dans un deuxième chapitre, les émissions atmosphériques et la consommation d'énergie dans l'industrie cimentaire sont présentées en chiffres (statistiques). Des causes et certaines solutions existantes dans le monde pour résoudre ces problèmes des émissions des gaz à effet de serre, de la pollution de l'atmosphère, ainsi que le problème de la forte consommation énergétique, sont développées aussi dans cette synthèse.

Dans le troisième chapitre, on s'intéresse à la présentation de la cimenterie de Béni-Saf (processus et chaîne de production), dont certaines statistiques correspondant à la production dans cette société (SCIBS) sont données.

Dans la dernière partie de ce mémoire, un ensemble des solutions que nous proposons pour la cimenterie de Béni Saf sont détaillées. Nous avons basé sur des technologies nouvelles afin d'assurer une réduction parfaite des émissions des polluants tel que le CO<sub>2</sub> et de la consommation d'énergie calorifique et électrique au sein de la SCIBS. Une solution plus développée et prometteuse, ainsi que des calculs préalables des consommations probables dans la cimenterie de Béni Saf sont données mêmes en Annexes de ce document. A la fin de

ce mémoire des conclusions tirées de ce travail et des perspectives sont présentées pour une industrie cimentaires moins néfaste à l'environnement et moins couteuse, et donc pour un ciment moins cher.

# Chapitre I.

## ***Le Ciment : Matériaux et étapes de fabrication***

---

### Sommaire du chapitre

#### **I.1. Introduction**

#### **I.2. Le matériau ciment**

##### **I.2.1. Définition**

##### **I.2.2. Un peu d'histoire**

##### **I.2.3. Différents processus de fabrication du ciment**

###### ***I.2.3.1. La voie sèche***

###### ***I.2.3.2. Autres techniques de préparation de la matière***

##### **I.2.4. La fabrication du ciment**

###### ***I.2.4.1. Les matières premières***

###### ***I.2.4.2. Différentes étapes de la fabrication du ciment par voie sèche***

#### **I.3. Quelques statistique sur la fabrication du ciment**

##### **I.3.1. Le marché mondial du ciment**

##### **I.3.2. Le marché national de ciment**

#### **I.4. Conclusion**

## Chapitre I.

# ***Le Ciment : Matériaux et étapes de fabrication.***

### **I.1. Introduction**

Le Ciment est le matériau du 20<sup>ème</sup> siècle, matériau centenaire, est un élément essentiel dans la construction qui intervient dans la composition du béton. Ce matériau joue le rôle de liant au contact de l'eau.

Le développement du ciment n'a pu s'effectuer que grâce à l'apparition de matériels nouveaux (fours rotatifs et broyeurs à boulets en particulier). Et les procédés de fabrication n'ont pas cessé de se perfectionner.

Dans cette première partie du document nous avons donné quelques notions et définitions générales sur le matériau ciment avec un petit passage historique. Les différents processus et les étapes de fabrication du ciment, depuis la préparation des matières premières jusqu'à l'obtention du produit final (le Ciment), sont détaillés dans ce chapitre. Ainsi que des statistiques nationales et internationales correspondant à la production de ce matériau sont données.

## I.2. Le matériau ciment

### I.2.1. Définition

Le ciment est une matière pulvérulente formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées. Son emploi le plus habituel est sous forme de poudre utilisée avec de l'eau pour agréger du sable et des graviers (granulats) pour donner le béton [3]. Comme définition physique; le ciment est un liant hydraulique se présentant sous forme de poudre fine qui est à base de calcaire et d'argile utilisé qui fait prise par ajouts d'eau [4]. Il durci rapidement et atteignant en peu de jours son maximum de résistance. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau.

On peut aussi donner une définition chimique à ce matériau: alors, un ciment artificiel est un produit provenant de la cuisson de mélanges artificiels (de la main de l'homme) de silice, d'alumine et de carbonate de calcium (de chaux), sur lesquels l'eau n'a aucune action (ou qu'une action particulièrement lente avant la trituration) et qui, réduits en poudre mécaniquement, font prise sous l'effet de l'eau en des temps variables suivant leur qualité.

### I.2.2. Un peu d'histoire

Les ciments auraient en premier lieu été découverts par les Égyptiens puis perfectionnés par les civilisations suivantes, tels que les Mayas et les chinois, par l'utilisation de chaux obtenue par cuisson de roches calcaires, suivie d'une extinction à l'eau [5]. Les Grecs d'Italie le renforcèrent avec des cendres pouzzolaniques (cendres volcaniques de la région de Pouzzoles), usage repris et généralisé par les Romains.

Jusqu'à l'Époque moderne, le ciment est un liant, fréquemment une chaux, additionnée d'adjuvant comme les tuiles ou briques concassées dont l'argile à des propriétés hydrauliques. La pouzzolane (terre volcanique de Pouzzoles, région de Naples, Italie) est particulièrement utilisée comme adjuvant. Le ciment ne prend son acception contemporaine qu'au XIX<sup>ème</sup> siècle, quand Louis Vicat identifie le phénomène d'hydraulicité des chaux en 1817 et celle des ciments [6].

En revanche, cette propriété d'hydraulicité du mélange ainsi constitué est restée totalement inexpliquée jusqu'aux travaux de Louis Vicat qui élabore, en 1817, la théorie de l'hydraulicité et fait connaître le résultat de ses recherches concernant la proportion d'argile et la température de cuisson. Il donne des indications précises sur les proportions de calcaire et de silice nécessaires pour constituer le mélange qui, après cuisson à la température convenable et broyage, sera un véritable liant hydraulique fabriqué industriellement : le ciment artificiel. L'industrie du ciment était née.

Quelques années plus tard, en 1824, le Britannique Joseph Aspdin dépose un brevet pour la fabrication d'une chaux hydraulique à prise rapide qu'il nomme commercialement le ciment

Portland (car la couleur de son produit ressemble aux célèbres pierres des carrières de la péninsule de «Portland» localisées en Manche.

En 1828, Louis Vicat réalise un pont suspendu en ciment, au dessus de la Corrèze, à Argentat, qui démontre la qualité de son matériau [5]. Dans les années qui suivent, Vicat parcourt la France afin de découvrir plus de trois cents carrières capables de fournir ces chaux hydrauliques et en publie les listes dans les Annales des Ponts et Chaussées.

Mais il faut attendre 1840, et la découverte des principes d'hydraulicité des ciments lents (dits actuellement ciments Portland) toujours par Louis Vicat (société Vicat) - une cuisson à la température de fusion pâteuse soit 1450 °C qui permet d'obtenir le clinker - pour voir une réelle fabrication de ces ciments modernes et apparaître ensuite une architecture de béton coffré puis béton armé [6].

#### ▪ **Naissance de l'industrie cimentière**

En France, un polytechnicien, Pavin de Lafarge, installe des fours à chaux au Teil, en 1833, et La première usine de ciment a été créée par Dupont et Demarle en 1848 à Boulogne-sur-Mer. La production industrielle de ciment débute alors dans la première moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle. Le développement n'a pu se faire que grâce à l'apparition de matériels nouveaux : four rotatif et broyeur à boulets en particulier. Le premier composant du béton est donc opérationnel à la fin de la première moitié du 19<sup>ème</sup> siècle [5]. Les procédés de fabrication se perfectionnèrent sans cesse : en 1870, pour produire une tonne de clinker (constituant de base du ciment) il fallait 40 heures, actuellement, il faut environ 3 minutes [6].

### **I.2.3. Différents processus de fabrication du ciment**

#### **I.2.3.1. La voie sèche**

C'est de très loin la technique la plus employée, aujourd'hui, dans le monde. La matière première est préparée sous forme de poudre. La pré-homogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des constituants essentiels du ciment, par superposition de multiples couches. Une station d'échantillonnage analyse régulièrement les constituants et le mélange pour en garantir la régularité. À la sortie du hall de pré-homogénéisation, le mélange est très finement broyé dans des broyeurs sécheurs, qui éliminent l'humidité résiduelle et permettent d'obtenir une poudre qui présente la finesse requise ; cette poudre, le « cru », est une nouvelle fois homogénéisée par fluidisation. Plus de détails sont donnés concernant ce processus de fabrication dans le paragraphe **I.2.4.2** ainsi que dans le chapitre III pour la cimenterie de Béni-Saf.

#### **I.2.3.2. Autres techniques de préparation de la matière**

D'autres techniques consistent à agglomérer la matière sous forme de granules (voie semi-sèche) ou à la transformer en une pâte fluide (voie semi-humide ou humide).

La voie humide est utilisée depuis longtemps. C'est le procédé le plus ancien, le plus simple mais qui demande le plus d'énergie.



Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont mélangés et broyés finement avec l'eau de façon, à constituer une pâte assez liquide (28 à 42 % d'eau). On brasse énergiquement cette pâte dans de grands bassins de 8 à 10 m de diamètre, dans lesquels tourne un manège de herse.

La pâte est ensuite stockée dans de grands bassins de plusieurs milliers de mètres cubes, où elle est continuellement malaxée et donc homogénéisée. Ce mélange est appelé le cru. Des analyses chimiques permettent de contrôler la composition de cette pâte, et d'apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson. La pâte est ensuite envoyée à l'entrée d'un four tournant, chauffé à son extrémité par une flamme intérieure [7].

En Algérie, le ciment n'est fabriqué que par la voie sèche. Alors, ci-dessous la voie sèche largement utilisée dans le monde dans l'industrie du ciment est détaillée.

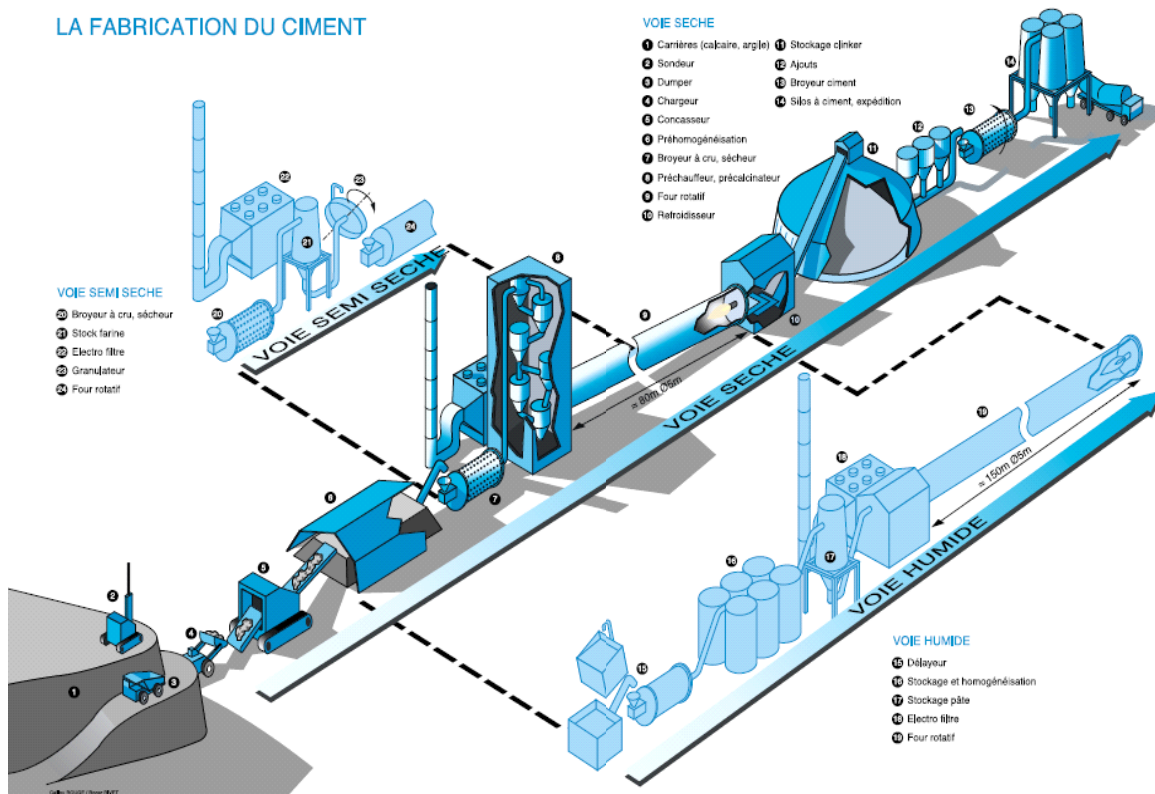


Fig. I.1. Fabrication du ciment par voie sèche et Humide [8]

## I.2.4. La fabrication du ciment

### I.2.4.1. Les matières premières

Les matières premières qui rentrent dans la fabrication du Ciment sont essentiellement de Calcaire (majoritairement composé de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ ) et d'Argile (un mélange complexe et souvent hydraté de silice ( $\text{SiO}_2$ ), d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et d'oxyde ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )). Ces deux principales matières sont en proportion respective moyenne de 80 % et 20 % [9].

Toutes matières renfermant essentiellement de la chaux (CaO), de la silice, de l'alumine, et de l'oxyde ferrique peuvent aussi être des matières premières qui rentrent dans la fabrication du Ciment, telles que "la Bauxite" qui est une roche latéritique blanche, rouge ou grise, caractérisée par sa forte teneur en alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et en oxydes de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). De structure variée, elle contient, dans des proportions variables, des hydrates d'alumine, de la kaolinite, de la silice et des oxydes de fer qui lui confèrent souvent une coloration rouge [5].

Pour produire des ciments de qualités constantes, les matières premières doivent être très soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière dans le temps. Mais si elle peut varier d'une cimenterie à l'autre en fonction de la qualité du gisement exploité, la composition du cru reste dans des proportions bien définies :

- Carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) : de 77 à 83 %
- Silice (SiO<sub>2</sub>) : de 13 à 14 %
- Alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) : de 2 à 4 %
- Oxyde ferrique (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) : de 1,5 à 3 %

La roche est échantillonnée en continu pour déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine et silice). Le mélange est ensuite réalisé dans un hall de pré-homogénéisation où la matière est disposée en couches horizontales superposées puis reprise verticalement. Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par apport de bauxite, d'oxyde de fer ou d'autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis.

#### **I.2.4.2. Différentes étapes de la fabrication du ciment par voie sèche**

Avant d'arriver aux produits finis que sont les différents types de ciments, le mélange de départ va passer successivement par différentes phases durant lesquelles la matière va subir une transformation chimique et cristalline importante.

La fabrication du ciment passe par 3 phases essentielles:

- La préparation de la matière première.
- La cuisson du cru.
- L'obtention du ciment

Chacune de ces phases est divisée en sous étapes:

- **La préparation de la matière première.**
  1. Extraction des matières premières
  2. Concassage
  3. La pré-homogénéisation
  4. Le broyage et le séchage
  5. L'homogénéisation
- **La cuisson du cru**
  6. Préchauffage
  7. Pré-calcination
  8. Clinkérisation
  9. Refroidissement

- **L'obtention du ciment**

10. Broyage du ciment
11. Stockage du ciment
12. Conditionnement et expédition.

Ces étapes de fabrication sont plus détaillées dans ce qui suit:

- **Préparation de la matière première**

La préparation de la matière première est une opération très importante qui intervient avant la cuisson du cru dans le four. Ainsi elle garantit une composition chimique constante et permet d'obtenir une poudre de la finesse requise [10, 11].

1. ***L'Extraction des matières premières***

Les matières premières vierges (comme le calcaire (75 à 80 %) et l'argile (20 à 25 %)) sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique ou encore par ripage au bulldozer. Elles sont extraites dans des carrières généralement proches de l'usine.

Après un concassage primaire, les matières premières sont transportées vers l'usine où elles sont stockées et préparées. D'autres matériaux tels que la bauxite, le minerai de fer, le laitier de haut fourneau ou le sable de fonderie sont approvisionnés par d'autres sources. L'étude du gisement des matières premières permet de définir la composition exacte du cru avec les besoins en ajouts qu'exige le procédé de fabrication. La qualité et la régularité requises pour les matières premières assurent, au final, la qualité de ciment recherchée.

2. ***Le Concassage***

Les blocs obtenus sont réduits, dans des concasseurs situés généralement sur le site même de la carrière, en éléments d'une dimension de 80 à 150 mm maximum. La matière ainsi obtenue est amenée par bande transporteuse ou convoyeur jusque dans l'usine [5].

3. ***La pré-homogénéisation***

Le ciment nécessite des teneurs proportionnées des différents composants : chaux, silice, alumine et oxyde ferrique. Le composant principal du mélange est le calcaire, riche en carbonate de calcium. L'argile est utilisée comme composant d'appoint.

Après concassage des blocs extraits de la carrière, on mélange, de façon aussi homogène que possible, leurs différents composants et les ajouts déterminés lors de la formulation. C'est la phase appelée de pré-homogénéisation.

La pré-homogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des constituants essentiels du ciment et de créer un mélange homogène. Les matières premières doivent être échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition régulière dans le temps. La prise d'échantillons en continu permet de déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine et silice) et arriver ainsi à la composition chimique idéale. Des roches naturelles, les marnes ou calcaires argileux, ont une composition qui est proche de la composition calcaire-argile. Des correcteurs, minerai de fer qui apporte l'oxyde

ferrique  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , bauxite riche en alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sable qui apporte la silice ( $\text{SiO}_2$ ) sont ajoutés pour atteindre la composition souhaitée [10].

Cette opération peut être réalisée soit dans un hall de pré-homogénéisation en disposant la matière en couches horizontales superposées, puis en la reprenant verticalement à l'aide d'une roue-pelle soit dans un silo vertical par brassage par air comprimé.

#### 4. **Le broyage et le séchage**

Le broyage procède par fragmentations successives des grains jusqu'à obtenir des grains de faible dimension pour faciliter leur cuisson. L'échange thermique et les réactions chimiques sont en effet d'autant plus intenses lors de la cuisson que les surfaces de contact entre les grains de matière et les gaz sont importantes.

À la sortie du hall de pré-homogénéisation, le mélange est très finement broyé dans des broyeurs sécheurs, qui éliminent l'humidité résiduelle et permettent d'obtenir une poudre qui présente la finesse requise. Cette poudre, appelé le « cru », est une nouvelle fois homogénéisée par fluidisation. Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par apport de bauxite, d'oxyde de fer ou d'autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis [5].

#### 5. **L'homogénéisation**

En sortant du broyeur, le cru doit être malaxé pour que le mélange acquière sa rhéologie optimale avant introduction dans les différents types de four. Le cru est homogénéisé et stocké dans des silos.

- **La cuisson du cru**

Une fois homogénéisé, la matière première est acheminée au four à l'aide d'un élévateur à godet pour la cuisson. Il s'agit de l'opération la plus importante du procédé de fabrication en termes de potentiel d'émissions, de qualité et de coût du produit.

##### 1. **Le préchauffage : la décarbonatation partielle**

Avant introduction dans le four, la farine (le cru) est chauffée à environ 800 °C dans un préchauffeur à grille ou à cyclones appelé échangeur de chaleur.

Un échangeur de chaleur comportant une série de quatre à cinq cyclone Dans lesquels la poudre déversé à la partie supérieure descend vers l'entrée du four rotatif. La matière froide, introduite dans la partie supérieure, se réchauffe au contact des gaz circulant à contre courant. D'étage en étage, elle arrive partiellement décarbonatée, jusqu'à l'étage inférieur, à la température d'environ 800 °C. L'opération commence par l'évaporation de l'eau que le mélange cru contient et se poursuit par la décarbonatation partielle.

##### 2. **La pré-calcination : décarbonatation complète (combustion du calcaire)**

La réaction chimique de base de la fabrication du ciment commence avec la décomposition du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) en chaux (oxyde de calcium,  $\text{CaO}$ ) accompagnée d'un dégagement de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ), à environ 900 °C.

Une décarbonatation plus complète peut être obtenue par l'ajout d'un foyer complémentaire situé dans le cyclone inférieur (précalcination).

La décarbonatation commencée dans le préchauffeur se fait pour l'essentiel dans le précalcinateur et se termine dans le four. Cette opération, qui s'effectue à des températures entre 650 et 900 °C, permet de libérer le gaz carbonique pour obtenir la chaux (oxyde calcium) nécessaire à la fabrication de clinker [10].

### 3. La Clinkérisation

Une fois préchauffée et décarbonatée, la farine "cru" entre dans le four rotatif et progresse jusqu'à la zone de clinkerisation (à environ 1450 °C). Le temps de parcours est de l'ordre d'une heure.

À partir de 650 °C, le carbonate de calcium du calcaire subit une décarbonatation ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ). On obtient alors de la chaux vive (CaO) accompagnée d'un important dégagement gazeux ( $\text{CO}_2$ ).

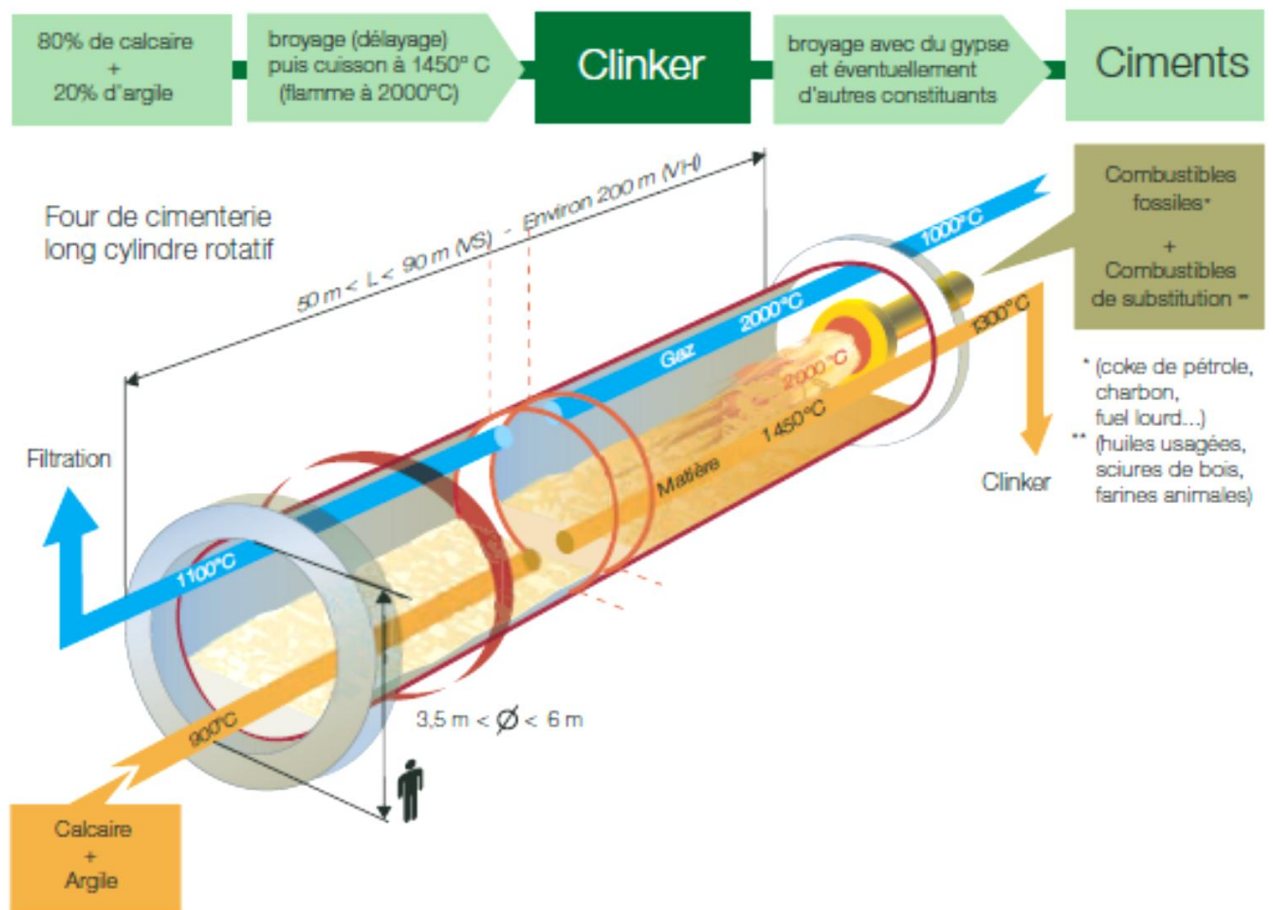


Fig. I.2. Schéma indiquant le processus pour l'obtention du clinker [12]

Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile, principalement composée de silicates ( $\text{SiO}_2$ ), d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et d'oxydes de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), se combinent à la chaux provenant du

calcaire pour donner des silicates et des aluminates de calcium pour former les nouveaux composés chimiques qui entrent dans la composition minéralogique du clinker.

Alors, le processus de calcination est suivi de la cuisson du clinker ou clinkérisation pendant laquelle l'oxyde de calcium réagit à haute température (en général entre 1400 et 1500 °C) avec la silice, l'alumine et l'oxyde ferreux pour former des silico-aluminates de calcium composant le clinker. La **Fig. I.2** montre un schéma indiquant la cuisson du clinker (clinkérisation). Alors, à partir de 1400 °C les réactions de clinkérisation se produisent :

Oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) + Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) + Oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ )  $\longrightarrow$  Alumino-ferrite tétracalcique ( $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ ).

Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) + Chaux vive ( $\text{CaO}$ )  $\longrightarrow$  Aluminate tricalcique ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ).

Ces deux composés nouvellement formés constituent la phase liquide du mélange. Celui-ci progresse vers la partie la plus chaude du four. La silice ( $\text{SiO}_2$ ) et la chaux vive ( $\text{CaO}$ ) réagissent entre-elles : Silice ( $\text{SiO}_2$ ) + chaux vive ( $\text{CaO}$ )  $\longrightarrow$  silicate bicalcique ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ).

S'il reste de l'oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ) qui n'a pas encore réagi, la réaction peut se poursuivre :

Silicate bicalcique ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) + chaux vive ( $\text{CaO}$ )  $\longrightarrow$  silicate tricalcique ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ).

Le four utilisé dans l'industrie cimentaire est un four horizontal rotatif cylindrique en acier (avec revêtement intérieur réfractaire) de 50 à 90 m de long, de 4 à 5 m de diamètre, légèrement incliné et tournant de 1 à 3 tours/minute.



**Fig. I.3.** Four horizontal rotatif cylindrique en acier [13]

Les principaux constituants du clinker sont les éléments suivant:



Tab. I.1. Constituant principaux du clinker

Nom cimentier	Formule	Min.	Max.
Alite (silicate tricalcique)	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5$	45.0 %	79.7 %
Bélite (silicate bicalcique)	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	5.7 %	29.8 %
Aluminate tricalcique	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	1.1 %	14.9 %
Aluminoferrite tétracalcique	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	2.0 %	16.5 %
Chaux libre	$\text{CaO}$	0.6 %	2.8 %

#### 4. Le refroidissement

À la fin de la cuisson, la matière est brusquement refroidie à l'air, ce qui permet de lui donner la structure cristallographique optimale. On obtient ainsi des grains solides à 150 °C : c'est le clinker, qui est transporté vers d'énormes silos de stockage. Le clinker se présente sous la forme de granules d'environ 2 cm de diamètre (**Fig. I.4**).



**Fig. I.4.** Granulés de clinker prêt à être broyé

- **L'obtention du ciment**

##### 1. Broyage du ciment

À la fin de la cuisson, la matière brusquement refroidie se présente sous forme de granules qui constituent le clinker. Celui-ci, finement broyé avec du gypse (environ 5 %) pour régulariser la prise, donne le ciment Portland. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets, dispositifs cylindriques chargés de boulets d'acier et mis en rotation (20 tours/minute) (**Fig. I.5**) [14]. D'autres ciments sont obtenus en ajoutant à cette phase de broyage divers constituants : laitier granulé de haut fourneau, cendres volantes, fillers, schistes calcinés, qui sont des matériaux pouzzolaniques.



**Fig. I.5.** Intérieur d'un broyeur à boulets [5]

La machine traditionnellement utilisée dans cette deuxième étape est le broyeur à boulets. De nouvelles techniques de broyage sont développées aujourd'hui - avec pour objectif de réduire drastiquement la consommation d'électricité - notamment les broyeurs à rouleau et les broyeurs verticaux.

Durant cette phase le ciment atteint une température élevée (150 °C), ce qui nécessite l'arrosage extérieur des broyeurs. À la sortie du broyeur, le ciment, passe au refroidisseur à force centrifuge pour que la température du ciment reste à environ 65 °C puis transporté vers des silos de stockage.

## **2. Stockage du ciment**

Des systèmes de transport mécaniques et pneumatiques peuvent être utilisés pour acheminer le ciment jusqu'aux silos de stockage. En règle générale, les premiers exigent des investissements plus importants que les seconds mais leur coût d'exploitation est bien inférieur. Le système de transport actuellement le plus courant combine le transport pneumatique et des transporteurs à vis sans fin ou à chaînes avec un élévateur à godets. Les différents types de ciments sont stockés dans des silos différents. Cependant grâce aux nouvelles conceptions, il devient possible de stocker des ciments différents dans un même silo [14].

## **3. Conditionnement et expédition**

Le ciment est chargé directement en vrac dans des camions citernes, des péniches ou des wagons (ou même en bateau) ou envoyé dans un atelier d'ensachage et de séchage.

Le schéma suivant résume le processus de fabrication ainsi les compositions dans chaque étape jusqu'à l'obtention du produit fini (Ciment).



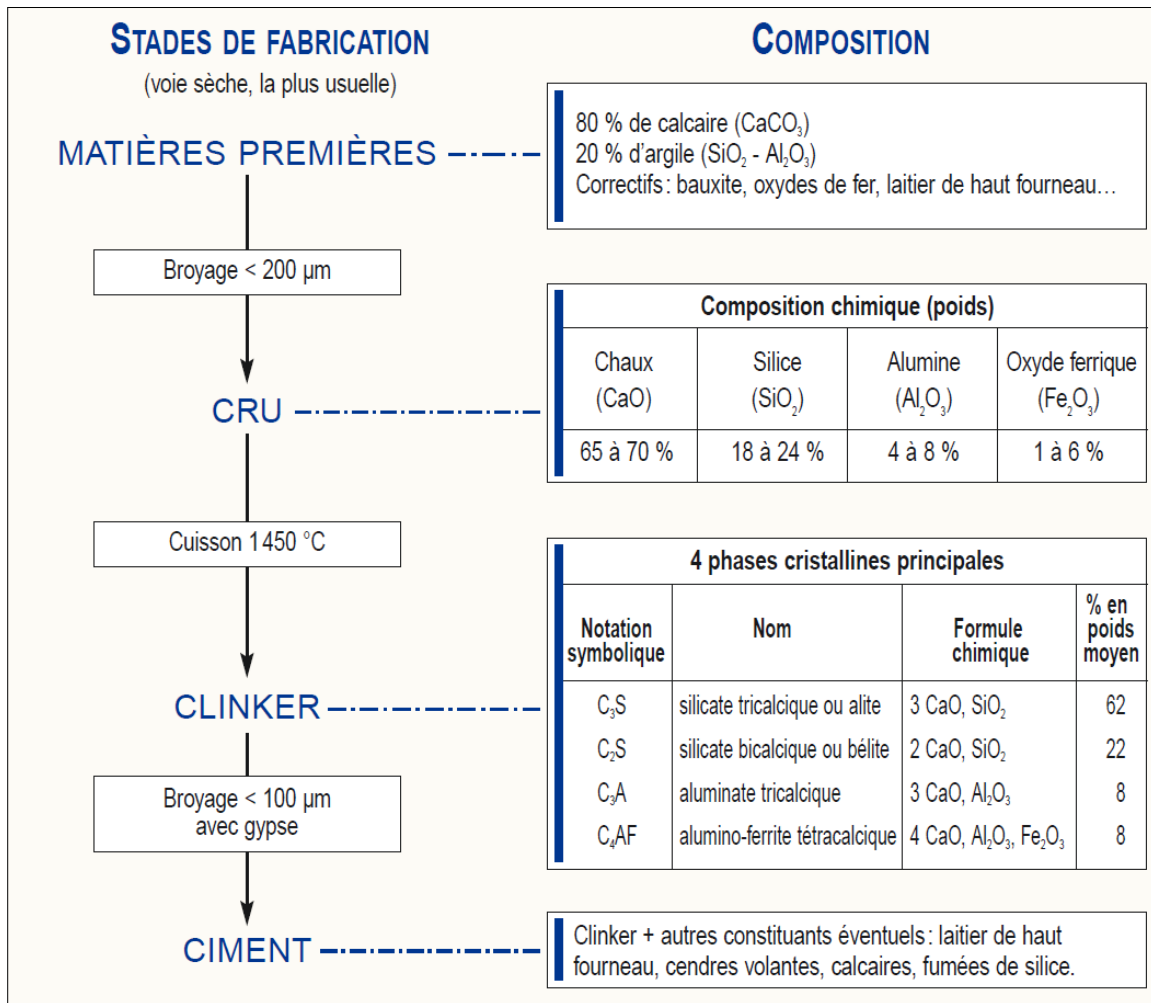


Fig. I.6. Différentes étapes de fabrication du Ciment [8]

### I.3. Quelques statistique sur la fabrication du ciment

#### I.3.1. Le marché mondial du ciment

Chaque seconde dans le monde, sont coulés 126 tonnes de ciment, soit 3,4 milliards de tonnes par an (La production mondiale de ciment est estimée à 4 milliards de tonnes en 2013) [1].

Au total, la production mondiale de ciment augmente régulièrement, grâce à la croissance de la production dans les Pays émergents : 1,37 milliard de tonnes en 1994, 2,55 milliards en 2006, 3,4 milliards de tonnes en 2011 : soit 2,8 % de plus par rapport à 2010 [15]. En moyenne, et selon des statistiques de l'année 2013, sur le plan mondial la production s'élève à 555 kg de ciment par habitant et par an.

Après 2 années de ralentissement dû à la crise (principalement en 2008), la production mondiale de ciment avait relevé la tête en 2010 avec une croissance de 9,2 % par rapport à l'exercice précédent. La production mondiale de ciment était de 3,3 milliards de tonnes en

2010, soit 9,2 % de plus par rapport à l'année 2009 ; elle était de 2,96 milliards de tonnes en 2009 [15].

Les marchés émergents consomment aujourd'hui 90 % de la production de ciment, contre 65 % au début des années 1990. La consommation mondiale de ciment devrait croître régulièrement jusqu'en 2030-2050, pour culminer autour de 5 Milliard de tonnes [16].

La **Chine** reste, et de loin, le premier producteur avec 57,5 % du total mondial, avec ses 2,3 milliards de tonnes annuelles, soit 1,7 tonne par habitant. Elle représentait 47 % du total mondial en 2006 et 29 % en 1994. La Chine a produit, seule, en 2013, l'équivalent de la production mondiale de 2005 : 2,3 milliards de tonnes en 2013, contre 2,31 milliards de tonnes pour la production mondiale.

L'**Inde** reste un second loin derrière, mais progresse régulièrement : ses 280 millions de tonnes annuelles représentent 12 % de la production chinoise, mais 7 % de la production mondiale. La production 2013 représente 227 kg par habitant.

Les **Etats-Unis** sont 3<sup>èmes</sup> : 77,8 millions de tonnes, soit 244 kg par habitant, et demeure un troisième qui décroît régulièrement : sa production représentait 5,7 % de la production mondiale en 1994, 3,9 % en 2006, et 1,9 % en 2013.

L'**Iran**, est 4<sup>ème</sup> : 75 millions de tonnes, soit 928 kg par habitant, a réalisé en 2013 nettement plus du double de sa production 2006 de 33 millions de tonnes.

Le **Brésil** est 5<sup>ème</sup> : un peu plus de 70 millions de tonnes, soit 344 kg par habitant : il progresse, lui aussi, très vite, car sa production n'était que de 26 millions en 1994, et de 39 millions en 2006.

La **Turquie** est 6<sup>ème</sup> : 70 millions de tonnes, soit 858 kg par habitant. Sa vitesse de progression s'est un peu ralentie ces dernières années : 47,5 millions en 2006, et 64 millions en 2011 [17].

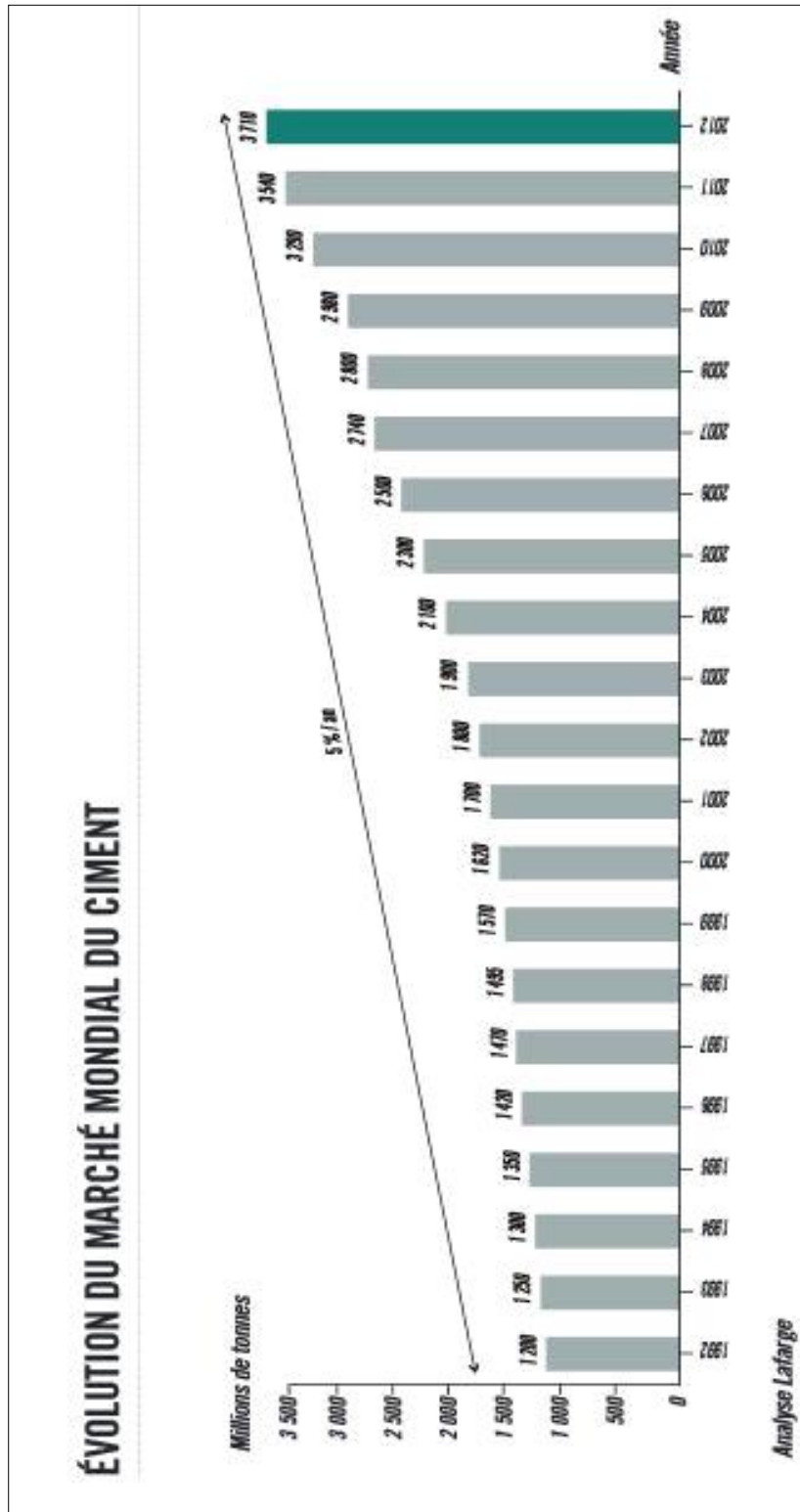


Fig. I.7. évolution du marché mondial du ciment [17]

Sur la période 2030-2050, la consommation de ciment de la Chine pourrait être abaissée au-dessous de 1,4 Mdt, tandis que celle de l'Inde pourrait atteindre 800 millions de tonnes. La consommation de ciment suit une courbe « en cloche », qui atteint son plus haut niveau en

phase de maturité – la Chine pourrait être en train d’aborder cette phase alors que l’Inde est encore en phase de croissance initiale – et décroît ensuite pour rejoindre un niveau de consommation asymptotique.

En effet, la production mondiale de ciment est dominée par quelques groupes internationaux occidentaux, le Suisse Holcime, le français Lafarge, l’irlandais CRH, l’allemand Heidelberg Cement, le mexicain Cemex et l’italien Italcementi.

**Tab. I.2.** Classement des 18 plus grands producteurs mondiaux  
 source de tableau : [http://www.lasyntheseonline.fr/matieres\\_premieres](http://www.lasyntheseonline.fr/matieres_premieres) [18]

<i>En millions de tonnes</i> (Source: USGS)	<b>2006</b>	<b>2008</b>
<b>Chine</b>	1 237,0	1 400,0
<b>Inde</b>	160,0	185,0
<b>USA</b>	99,7	87,6
<b>Iran</b>	33,0	44,4
<b>Brésil</b>	39,5	52,0
<b>Turquie</b>	47,5	54,0
<b>Russie</b>	54,7	53,5
<b>Vietnam</b>	32,7	40,0
<b>Japon</b>	69,9	62,8
<b>Arabie saoudite</b>	27,1	31,8
<b>Korè du sud</b>	54,0	51,7
<b>Egypte</b>	36,2	39,8
<b>Mexique</b>	40,4	37,1
<b>Indonésie</b>	35,0	36,0
<b>Thaïlande</b>	39,4	31,7
<b>Allemagne</b>	33,6	33,6
<b>Pakistan</b>	20,7	30,8
<b>Italie</b>	47,8	43,0
<b>Autres pays</b>	491,8	535,2
<b>Le monde entier</b>	2 600,0	2 850,0

Le ciment a un faible rapport "valeur/poids" d'où des coûts de transport élevés, la production cimentière reste avant tout locale : 95 % en moyenne du ciment consommé dans le monde sont utilisés dans le pays de production.

Pour être compétitifs, les cimentiers installent généralement leurs unités de production à proximité d’importantes réserves de calcaire et d’argile offrant un accès aisé à une source d’énergie fiable. Les classements des tableaux ci-dessous présentent, par ordre décroissant,

l'évolution de production des pays producteurs de ciment, pour les 18 premiers mondiaux de 2006 au 2008 [13].

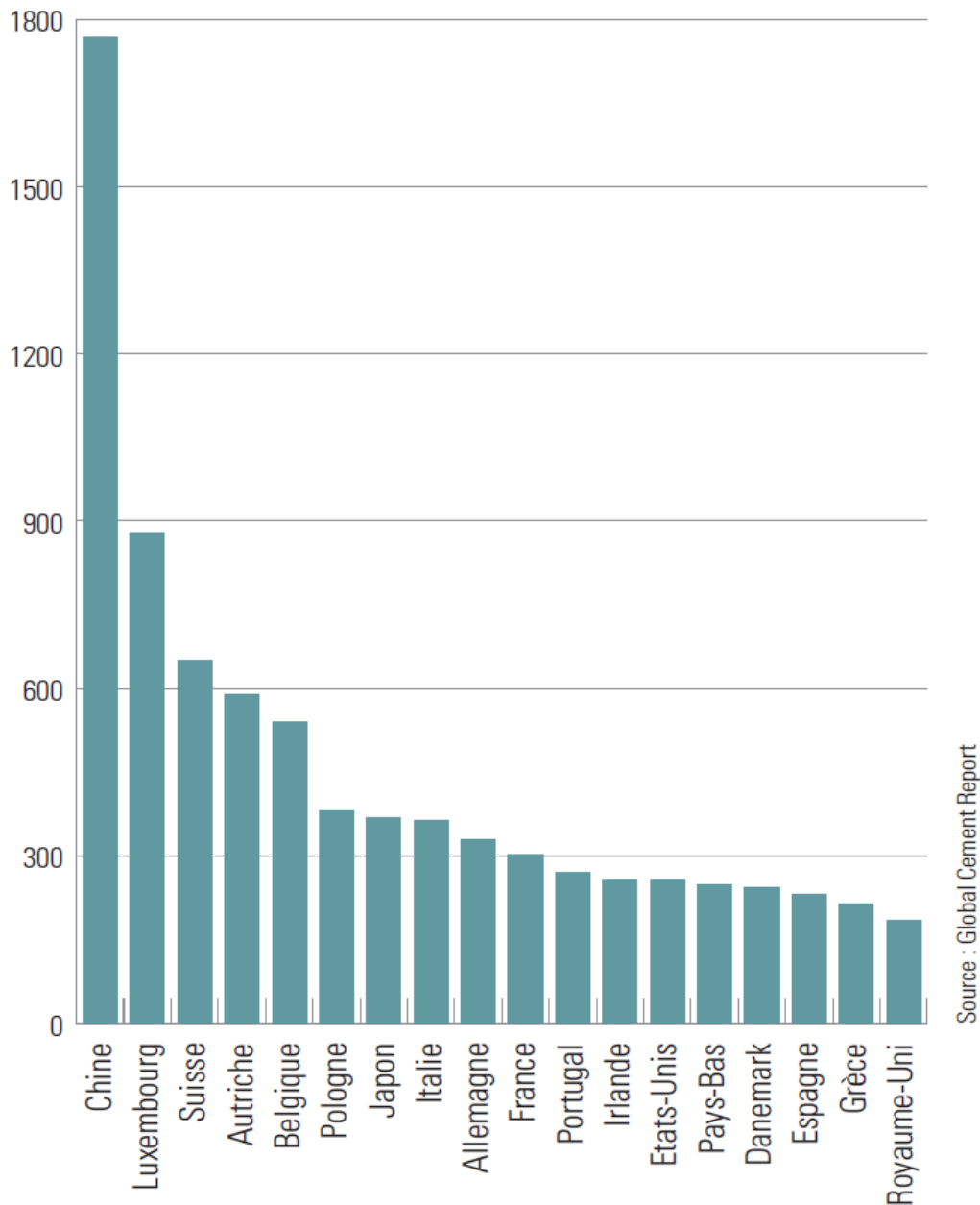
Le tableau ci-dessous le **Tab. I.3** montrent l'évolution de production des pays producteurs de ciment, pour les 21 premiers mondiaux de 2011 au 2014 [17]. Ainsi que la **Fig. I.8** montre des statistiques de l'année 2014 indiquant la consommation de ciment par habitant dans 18 pays de différent continents du monde.

**Tab. I.3.** Production de ciment dans le monde en millions de tonnes. [17]

	2011	2012	2013	2014
<b>Total Monde</b>	<b>3 638,7</b>	<b>3 782,7</b>	<b>4 074,8</b>	<b>4 181,3</b>
Chine	2 080,0	2 184,0	2 414,0	2 476,0
Inde	240,5	246,7	255,8	265,1
Etats-Unis	67,9	74,2	76,6	82,7
Turquie	67,8	67,6	74,4	77,2
Brésil	64,1	68,8	70,2	71,4
Russie	56,1	61,6	66,3	68,5
Iran	66,4	70,2	68,7	66,7
Viet-Nâm	52,0	54,0	61,0	64,5
Japon	56,4	59,3	61,7	62,5
Indonésie	45,2	52,3	56,7	57,8
Arabie Saoudite	48,4	53,2	55,7	57,2
Egypte	45,4	52,2	50,1	49,0
Corée du Sud	48,3	46,9	47,3	47,3
Mexique	35,4	37,8	36,3	37,8
Pakistan	31,6	33,1	33,6	35,3
Thaïlande	30,3	31,7	35,6	34,9
Allemagne	33,5	32,4	31,3	32,0
Malaisie	20,3	20,2	21,3	21,7
Italie	32,8	26,2	23,1	21,2
France	19,4	18,0	17,5	16,6
Espagne	22,2	15,9	13,7	13,9

Source : Global Cement Report

À partir des statistiques de l'année 2014, La figure ci-dessous montre la consommation (en kg) de ciment par habitant dans le monde.



**Fig. I.8.** Consommation de ciment par habitant dans le monde (statistiques de l'année 2014 - en kg) [18]

### I.3.2. Le marché national de ciment

La production du secteur public de ciment en Algérie est passée depuis l'indépendance ce jour de 1,5 million de tonnes par an seulement en 1962, à plus de 12 millions de tonnes actuellement. Le Groupe industriel des ciments d'Algérie (GICA) a produit 12.143.557

tonnes de ciment en 2015 contre 11.555.280 tonnes en 2014 soit une augmentation de 5 %, a indiqué le groupe [19].

Le besoin en ce matériau stratégique a fortement augmenté au cours des dernières années avec le lancement de grands chantiers inscrits dans le plan d'action du gouvernement comme les autoroutes, les voies ferrées, les barrages et les projets de réalisation de logements.

La production nationale actuelle de ciment (secteur privé et public) n'arrive pas à satisfaire la forte demande sur ce produit, dans un marché accusant un déficit de 5 millions de tonnes. Mais malgré l'insuffisance de l'offre, l'industrie algérienne du ciment a connu une évolution "remarquable" au fil des années étant donné que le secteur qui ne comptait que les cimenteries de Meftah (Blida), de Rais Hamidou (Alger) et de Zahana (Mascara) à l'indépendance (1962), a vu la réalisation de neuf autres sociétés des ciments, implantées sur tout le territoire national [15].

Actuellement, ce secteur qui est sous la coupole du Groupe industriel des ciments d'Algérie (GICA), qui a été créé en 2009, compte douze cimenteries publiques qui sont les cimenteries de Hadjar-Soud (Annaba), de Ain Kebira (Sétif), de Hamma Bouziane (Constantine), de Tébessa, de Ain Touta (Batna), de Sour El Ghozlane (Bouira), de Rais Hamidou (Alger), de Zahana (Mascara), de Béni-Saf (Ain Temouchent), de Saida, de Oued Sly (Chlef) et de Meftah (Blida).

#### ▪ **L'Algérie, un pays exportateur du ciment en 2018**

Le Groupe industriel des ciments d'Algérie (GICA) a consacré ces dernières années (depuis 2015) un investissement de 154 milliards de DA pour porter sa capacité de production annuelle de ciment à 19 millions de tonnes à l'horizon 2018, contre 12 millions de tonnes actuellement [20].

La vision stratégique du Groupe GICA est basée essentiellement sur l'augmentation de sa part de marché, ainsi que sur un positionnement sur le marché international.

Le plan de développement du Groupe GICA prévoit également l'extension des capacités de production de deux (2) cimenteries existantes, sur lesquelles le Groupe compte réaliser 2 nouvelles lignes technologiques. Les usines concernées par le programme d'extension des capacités de production sont:

- La Cimenterie de Aïn El Kebira (Sétif),
- La Cimenterie de Oued Sly (Chlef),

En Effectuant une visite d'inspection dans la wilaya de Sétif durant le mois de Janvier 2017, le ministre de l'Industrie et des Mines Mr. Abdesselam Bouchouareb a affirmé que la mise en service de la deuxième ligne de production de la cimenterie d'Aïn Kbira (+2 millions de tonnes), l'augmentation de la production de l'usine de Chlef (+2 millions de tonnes) et celle d'Adrar (+1,5 million de tonnes) permettra à l'Algérie de satisfaire ses besoins. Alors, et selon le ministre de l'Industrie et des Mines, la production nationale du ciment augmentera d'ici le mois d'octobre de l'année en cours (2017) de 5,5 millions de tonnes.

Au cours de l'année 2018, l'Algérie procédera à l'exportation du surplus de la production nationale selon Mr. Abdesselam Bouchouareb.

Le Groupe GICA prévoit aussi la réalisation de trois nouvelles cimenteries d'une capacité de production annuelle globale de 4 millions de tonnes de ciment. Ces nouvelles usines (en cours de construction) qui entreront en production en novembre 2018, sont implantées à :

- Sigus (Oum El Bouaghi),
- Beni Zireg (Béchar),
- El Bayadh

Outre ces réalisations, le plan de développement du Groupe GICA porte sur la modernisation des cimenteries en exploitation.

Sur le plan international, le groupe ambitionne de décrocher des parts de marchés à l'étranger en exportant sa surproduction de ciment une fois que la demande nationale sera satisfaite. Alors, la situation pourrait changer dans les prochaines années avec l'entrée en production de plusieurs projets en cours qui vont mettre sur le marché une production additionnelle substantielle de ciment.

Conformément aux orientations des pouvoirs publics visant à encourager l'investissement productif, notamment dans les filières stratégiques, et à réduire les importations, GICA compte augmenter sa production à près de 23 millions de tonnes à l'horizon 2019, a-t-on estimé [19].

Le secteur privé vise aussi à investir de plus en plus dans l'industrie du ciment en Algérie. La production nationale pourra donc augmenter largement dans les prochaines années avec l'entrée en production de plusieurs projets en cours:

- Le tout récent projet à être par le Conseil National d'Investissement (CNI), celui de la méga-cimenterie d'Issad Rebrab, à El Khroub (Constantine) devrait apporter, à terme, une production supplémentaire de 8 millions de tonnes.
- Il s'ajoute au projet de la cimenterie de Biskra (Cilas) une joint-venture entre le privé algérien Abdennour Souakri et le groupe Lafarge, d'une capacité de 6 millions de tonnes par an.

Par ailleurs, le P-DG de groupe ETRHB et président du Forum des chefs d'entreprise (FCE); Mr. A. Haddad, a annoncé en 2016 le lancement prochain des travaux de réalisation de deux cimenteries, dont la capacité de production commune devrait atteindre 10 millions de tonnes par an, 36 mois suivant son entrée en service [21].

- La première cimenterie, appartenant au groupe ETRHB, sera implantée à Relizane et devrait produire 6 millions de tonnes par an.
- La seconde cimenterie, qui sera réalisée à Djelfa en partenariat avec deux entreprises algérienne et chinoise, devrait compléter les 4 millions de tonnes par an [21].

En tout, ce serait une capacité additionnelle de 28 millions de tonnes par an qui sera mise sur le marché si tous les projets se réalisent. La production actuelle des douze cimenteries



du Groupe industriel du ciment en Algérie (GICA) et deux usines de Lafarge est estimée à 19 millions de tonnes/an pour une demande de 22 millions de tonnes.

#### **I.4. Conclusion**

D'après les statistiques présentées dans ce chapitre, nous avons remarqué une augmentation très significative dans la production du ciment, que ce soit au niveau national ou international.

Cette augmentation en production de ce matériau en Algérie est dû à la demande qui est toujours en croissance suite au lancement de grands projets dans lesquelles le gouvernement s'est engagé, comme la réalisation des routes et autoroutes, les logements, les chemins de fer, les barrages,...etc. Pour répondre à cette grande demande en ce matériau, la production est assurée aujourd'hui par le secteur public et privé, alors des investissements dans ce secteur d'industrie cimentaire en Algérie est en croissance aussi non seulement pour répondre au besoin national mais aussi dans l'objectif d'exporter le ciment vers des pays étrangers et réduire la facture de l'importation.

# Chapitre II

## ***Les émissions atmosphériques et la consommation d'énergie dans l'industrie du ciment***

---

### Sommaire du chapitre

- II.1. Introduction
- II.2. Les émissions atmosphériques dans l'industrie du ciment
  - II.2.1. Introduction
  - II.2.2. Les gaz d'échappement
    - II.2.2.1. *Les émissions de l'Oxydes d'Azote (NO<sub>x</sub>)*
    - II.2.2.2. *Les émissions de Dioxydes de Soufre (SO<sub>2</sub>)*
    - II.2.2.3. *Les émissions de Dioxyde de Carbone (CO<sub>2</sub>)*
    - II.2.2.4. *Les émissions de Dioxines et Furannes*
    - II.2.2.5. *Les émissions de HCl*
  - II.2.3. Les matières particulaires
  - II.2.4. Les émissions de poussières
  - II.2.5. Les émissions de métaux lourds et autres polluants atmosphériques
  - II.2.6. Les émissions à la cheminée
- II.3. Consommation énergétique
  - II.3.1. Introduction
  - II.3.2. Les besoins calorifiques
  - II.3.3. Les besoins électriques
  - II.3.4. Les sources d'économie d'énergie
- II.4. La valorisation énergétique
  - II.4.1. Comment les déchets sont-ils utilisés pour produire du ciment ?
  - II.4.2. Quel traitement est le moins nocif pour l'environnement ?
  - II.4.3. Utilisation des ressources et production de déchets
- II.5. Conclusion

## Chapitre II

# ***Les émissions atmosphériques et la consommation d'énergie dans l'industrie du ciment***

### **II.1. Introduction**

La consommation d'énergie, que ce soit électrique ou calorifique, au niveau de l'industrie cimentaire a augmenté régulièrement avec l'augmentation de la production.

L'industrie du ciment a évolué en fonction des innovations enregistrées dans différents domaines lui permettant d'intégrer des technologies modernes dans les différentes étapes de la fabrication, mais cela n'empêche pas la production d'engendrer des nuisances sur l'environnement, donc la fabrication du ciment impacte négativement sur l'environnement, à travers des émissions atmosphériques nocives.

Alors, dans cette deuxième partie du document nous avons cité les différentes émissions atmosphériques avec quelques statistiques, dont les gaz d'échappement (le dioxyde de soufre, le dioxyde de carbone ...) ainsi que les matières particulaires, des émissions de poussières et même des émissions de métaux lourds et d'autres polluants atmosphériques.

Dans ce chapitre, nous avons aussi souligné la quantité importante de l'énergie (électrique et calorifique) qui peut être consommé par l'industrie cimentaire. Alors, quelques statistiques ont été données dans ce chapitre.

### **II.2. Les émissions atmosphériques dans l'industrie du ciment**

#### **II.2.1. Introduction**

Les émissions atmosphériques issues de la fabrication du ciment sont générées par la manutention et le stockage des matériaux intermédiaires et finaux, et par l'exploitation des systèmes de fours, des refroidisseurs à clinker et des broyeurs.

Depuis plusieurs années maintenant, des contrôles des émissions des cimentiers sont effectués. Les contrôles concernent différents polluants: poussières, bien sûr, mais aussi métaux lourds, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl, dioxines et furannes,...etc. [22]. Les conditions d'exploitation fixent, en effet, de manière très précise, les paramètres à mesurer à la sortie de la cheminée ainsi que les contrôles et les analyses à effectuer. Ces mêmes conditions déterminent également des "valeurs limites d'émissions" (VLE), exprimées en concentration de polluant dans les fumées par m<sup>3</sup> [23]. Les émissions à la cheminée doivent donc particulièrement bien suivies et contrôlées.

## II.2.2. Les gaz d'échappement

### II.2.2.1. Les émissions de l'Oxydes d'Azote (NO<sub>x</sub>)

Au cours des processus de combustion à haute température qui se déroulent dans les fours à ciment, des émissions d'oxyde d'azote (NO<sub>x</sub>) sont générées. Les principaux oxydes d'azote émis par l'industrie cimentière sont le monoxyde d'azote NO et le dioxyde d'azote NO<sub>2</sub> [22]. Ils ont deux origines possibles :

- *Une origine dite thermique* : À haute température, l'Azote de l'air (sous forme de N<sub>2</sub>) réagit avec l'Oxygène de l'air pour former des Oxydes d'Azote. L'importance de ces émissions dépend donc de la quantité d'air injectée pour la combustion et de la température. Le cimentier, en optimisant la température et l'injection d'air dans les limites tolérées par le procédé de fabrication, restreint au mieux les émissions de NO<sub>x</sub>.
- *Les combustibles* : Lors de la combustion, l'azote contenu dans les combustibles peut se transformer en oxydes d'azote par réaction avec l'oxygène de l'air [24]. Les émissions de NO<sub>x</sub> sont donc également fonction des caractéristiques des combustibles utilisés.

Dans le monde industrielle, les valeurs limites d'émissions sont en cours de révision. Elles étaient jusque fin 2005 de 1200 à 1800 mg/m<sup>3</sup> et seront (ou sont déjà dans certains cas) ramenées à 800 mg/m<sup>3</sup> [22]. Cette nouvelle limite est d'ores et déjà respectée sur tous les sites.

Ci-dessous la **Fig. II.1** présente un exemple sur les émissions de l'Oxyde d'Azote ramenées à la tonne de clinker produite dans les cimenteries en Belgique (statistiques entre 2001 et 2005) [25] dont les données comprenant les émissions du four à clinker et des autres installations (broyeurs, sécheur,...etc.). La **Fig. II.1** montre que les émissions de NO<sub>x</sub> ont diminué de 10 % entre 2001 et 2005 [22].

Selon la **Fig. II.1**, l'augmentation des émissions entre 2003 et 2004 s'explique par différents facteurs. Ainsi, un changement important dans la recette des combustibles au niveau du four a contraint le cimentier à augmenter l'injection d'air dans ce four [26]. Cela a provoqué une augmentation des émissions de NO<sub>x</sub> thermiques. Alors, afin de ne pas être obligé d'apporter un « excès » d'air dans le four, des aménagements techniques peuvent être réalisés dans les cimenteries. En outre, des consignes strictes de conduite des fours sont appliquées en Europe depuis 2005 pour réduire cet impact.

Enfin, il est à signaler que plusieurs pays dans le monde, européens principalement, ont investi ces dernières années dans des installations de réduction des émissions de  $\text{NO}_x$ . Ces installations permettront de réduire l'impact de l'utilisation accrue de combustibles de substitution.

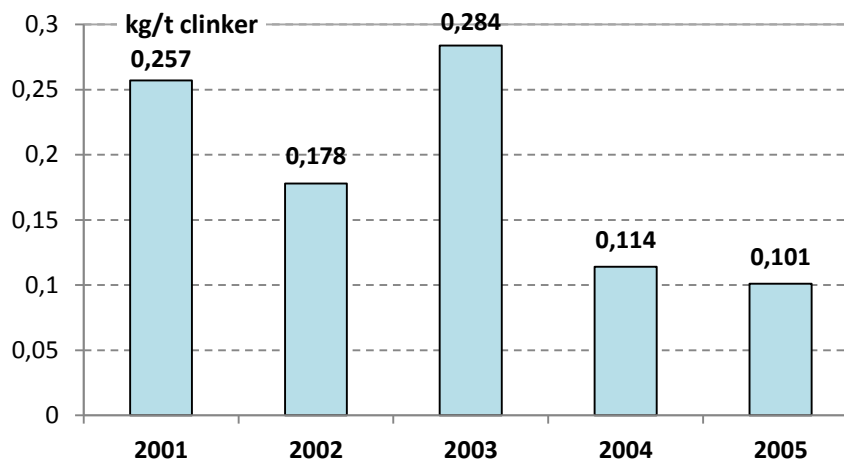


Fig. II.1. Émissions de  $\text{NO}_x$  ramenées à la tonne de clinker produite [27]

Pour la prévention et de maîtrise des émissions de  $\text{NO}_x$ , plusieurs techniques (citées ci-dessous) sont recommandées. Ces techniques, qui s'ajoutent à la nécessité d'assurer la bonne marche des fours, consistent à :

- Maintenir une distribution d'air secondaire aussi minime que possible (par exemple, réduction de l'oxygène);
- Refroidir la flamme en ajoutant de l'eau au combustible, ou directement sur la flamme (par exemple, diminution de la température et augmentation de la concentration de l'hydroxyle). La pratique du refroidissement de la flamme peut avoir un impact négatif sur la consommation de combustible, qu'elle risque d'accroître dans une proportion comprise entre 2 et 3 %, entraînant un accroissement proportionnel des émissions de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) [24];
- Utiliser des brûleurs à faible émission de  $\text{NO}_x$  pour éviter des points chauds d'émissions localisés ; élaborer un processus de combustion étagée, tel qu'il est applicable dans les fours de préchauffage/précalcination et les fours de préchauffage.

#### II.2.2.2. Les émissions de Dioxydes de Soufre ( $\text{SO}_2$ )

Le dioxyde de soufre est le principal oxyde de soufre émis par les cimenteries. Ces émissions sont principalement associées à la teneur en soufre volatil ou réactif des matières premières et, certes dans une moindre mesure, à la qualité des combustibles utilisés pour produire de l'énergie. Elles sont donc essentiellement la conséquence de la présence de soufre dans la pierre (présence de pyrite ou de soufre organique) et ne dépendent généralement pas directement de la combustion de déchets (voir Fig II.4). Les émissions de  $\text{SO}_2$  sont donc

fortement dépendantes du gisement exploité, ce qui explique des différences parfois importantes entre les émissions des différents fours.

Les techniques de prévention et de maîtrise des émissions de SO<sub>2</sub>, qui s'ajoutent à la nécessité d'assurer la bonne marche des fours, consistent notamment à :

- Choisir des matériaux de carrière qui ont une faible teneur en soufre volatil ;
- Utiliser des broyeurs verticaux, et y faire transiter les gaz pour récupérer l'énergie et réduire la teneur en soufre du gaz. Dans le broyeur, le gaz contenant de l'oxyde de soufre se mélange avec le carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) de l'agrégat brut et produit du sulfate de calcium (gypse) [28] ;
- Choisir une source de combustible dont la teneur en soufre est faible ;
- Injecter des absorbants comme de la chaux hydratée (Ca(OH)<sub>2</sub>), de l'oxyde de calcium (CaO) ou des cendres volantes à haute teneur en CaO dans les gaz brûlés avant de les acheminer vers les filtres .

### II.2.2.3. Les émissions de Dioxyde de Carbone (CO<sub>2</sub>)

L'industrie cimentière est aussi fortement émettrice de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone – CO<sub>2</sub>), provenant des besoins en "énergie calorifique", mais aussi du procédé de fabrication du ciment. Alors, ces émissions de gaz carbonique sont principalement associées à la combustion du combustible, c'est à dire à un processus basé sur une combinaison physico-chimique à très haute température (consommatrice d'énergie). C'est ce que l'on appelle le CO<sub>2</sub> énergétique "direct". Une autre source d'émission de CO<sub>2</sub> en cimenterie est l'utilisation de l'électricité, principalement dans les installations de broyage. C'est le CO<sub>2</sub> énergétique "indirect" (ces émissions ne représentent qu'une petite partie du total) (voir **Fig. II.2**). Mais la principale source d'émission de CO<sub>2</sub> est due au processus chimique. Donc, le CO<sub>2</sub> produit lors de la fabrication du ciment vient principalement d'un phénomène de transformation du calcaire (CaCO<sub>3</sub>), sous l'effet de la chaleur dans le four à clinker, en chaux libre (CaO) et en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>).

Plus de 60 % des émissions de CO<sub>2</sub> lors de la fabrication de ciment proviennent de cette "décarbonatation" [6, 17]. Le CO<sub>2</sub> sous-produit de cette réaction est appelé CO<sub>2</sub> "de procédé". La figure ci-dessous (**Fig. II.2**) donne un exemple sur la répartition (les différentes sources) des émissions de CO<sub>2</sub> dans une cimenterie européenne (en Belgique) durant l'année 2005 [27].

Le CO<sub>2</sub> émis par les lignes de production provenant de la combustion dépend de la consommation calorifique de l'installation ; les émissions sont comprises entre 300 et 500 kg de CO<sub>2</sub> par tonne de clinker pour tous combustibles confondus (entre 130 kg et 500 kg de CO<sub>2</sub>/tonne de clinker si les émissions provenant des déchets et de la biomasse sont exclues.

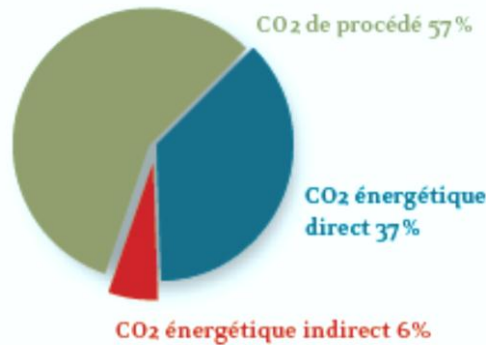


Fig. II.2. Répartition des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur cimentier (2005) [27]

Toute mesure d'économie d'énergie et d'utilisation de déchets comme combustibles de substitution ou comme matière première permettra donc de réduire l'utilisation de combustibles fossiles primaires et de réduire les émissions de gaz à effet de serre associées.

Si le procédé cimentier est un gros consommateur d'énergie génératrice de CO<sub>2</sub>, les procédés de fabrication du clinker contribuent aussi aux émissions de gaz à effet de serre.

En effet, au cours de la fabrication du clinker, le calcaire (carbonate de calcium) se décompose en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) qui s'échappe à la cheminée et en chaux libre (CaO). Le CO<sub>2</sub> émis lors de la décarbonatation est évalué à 520 kg de CO<sub>2</sub> par tonne de clinker [25].

La seule façon de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> est d'utiliser des produits déjà décarbonatés, tels que les laitiers de sidérurgie. On les utilise généralement en substitut partiel du clinker car ils disposent d'une aptitude au développement des résistances mécaniques similaires au clinker [29]. On commence à les utiliser comme substitut partiel des matières constitutives du "cru" lorsque leur aptitude à remplacer le clinker est faible.

Les techniques de prévention et de maîtrise des émissions de CO<sub>2</sub> recommandées, qui s'ajoutent à la nécessité d'assurer la bonne marche des fours, consistent, notamment, à :

- Produire des ciments mélangés, qui ont le potentiel de réduire de manière significative la consommation de combustible et les émissions de CO<sub>2</sub> subséquentes par tonne de produit fini ; procéder à des choix et à une exploitation qui favorisent l'efficacité énergétique (four de préchauffage/pré-calcination par voie sèche) ;
- Choisir un combustible pour lequel le rapport teneur en carbone/valeur calorifique est faible (par exemple, gaz naturel, huile combustible ou combustible provenant de déchets) ;
- Opter pour des matières premières qui renferment peu de matière organique. Le monoxyde de carbone (CO) contribue, dans une proportion mineure, aux émissions des gaz à effet de serre (moins de 0,5 à 1 % de l'ensemble des émissions gazeuses). Ces émissions sont généralement liées à la teneur en matière organique des matières premières [22].

#### **II.2.2.4. Les émissions de Dioxines et Furannes**

Les Dioxines et Furannes sont des hydrocarbures polycycliques aromatiques chlorés et leur formation est essentiellement la conséquence d'activités humaines.

Tous les procédés de combustion sont potentiellement générateurs de dioxines et furannes : industrie utilisatrice de Chlore, procédés industriels à haute température, incinérateurs de déchets, chauffage domestique, transports... etc.

Les Dioxines et Furannes peuvent, en effet, être formés lorsque du Chlore et des composés organiques sont présents et portés à des températures favorables, c'est-à-dire à des plages comprises entre 250 et 400 °C. Cependant, ces molécules sont détruites lorsqu'elles sont soumises à des températures suffisantes (> 850 °C) [27], sur une durée adéquate et si la température est suffisamment homogène. En outre, le refroidissement doit être rapide après la combustion afin de ne pas conduire à des reformations.

Le Chlore et les matières organiques sont présents dans les fours des cimenteries. Cependant, les conditions nécessaires à la destruction des molécules de Dioxines et Furannes sont particulièrement bien rencontrées dans les fours à clinker notamment car la température s'y élève jusqu'à 2000 °C.

De plus, les zones de températures moins élevées se situant en aval de la combustion ne sont pas non plus favorables à la formation de Dioxines et Furannes car les précurseurs organiques ont été détruits lors de leur passage à plus de 1000 °C et les autres réactifs (HCl et Oxygène) ne sont plus disponibles.

Des valeurs limites d'émissions toujours respectées. Par exemple, la "VLE" appliquée aux fours à clinker est la même que celle appliquée aux incinérateurs de déchets dangereux par la législation européenne et est fixée à 0,1 g T<sub>éq</sub>/m<sup>3</sup>. À l'heure actuelle, dans la plupart des pays européens, les émissions de dioxines de l'industrie cimentière restent particulièrement basses : de l'ordre de 0,6 g T<sub>éq</sub>/an.

#### **II.2.2.5. Les émissions de HCl**

Le Chlore provient à la fois des matières premières et des combustibles utilisés dans les fours à ciment. Il est important de constater que près de 90 % du Chlore introduit dans les fours est intégré dans le ciment et ne se retrouve donc pas dans les fumées [30].

Par ailleurs, on constate que le taux d'émission de ces composés n'est pas significativement influencé par le taux d'utilisation de déchets comme combustible. Les limites d'émissions imposées aux cimenteries sont dérivées de la directive européenne sur la co-incinération des déchets. Ces limites sont respectées par toutes les cimenteries.

#### **II.2.3. Les matières particulaires**

Les émissions de matières particulaires (MP) comptent parmi les impacts les plus importants engendrés par la fabrication de ciment. Les principales sources d'émissions de



matières particulaires et les méthodes de prévention et de maîtrise préconisées pour chacune d'entre elles sont indiquées ci-après.

Pour les émissions de MP associées à la manutention et au stockage des matériaux intermédiaires et finaux (y compris le concassage et le broyage des matières premières), à la manutention et le stockage des combustibles solides, au transport des matériaux (par exemple, par camions ou bandes transporteuses), et aux activités d'ensachage, les techniques de prévention et de dépollution recommandées consistent, notamment, à :

- Définir une configuration simple et linéaire pour les opérations de manutention des matériaux, afin de limiter le nombre de points de transfert ;
- Utiliser des bandes transporteuses fermées pour le transport des matériaux, et des dispositifs de contrôle des émissions aux points de transbordement ;
- Nettoyer les bandes de retour des systèmes de bandes transporteuses ;
- Stocker les matières premières concassées et qui ont subi un mélange préalable dans des baies couvertes ou fermées ;
- Emmagasinier les combustibles issus de déchets dans des aires protégées du vent et des autres éléments météorologiques ;
- Entreposer le clinker dans des baies couvertes ou fermées, ou dans des silos munis de systèmes automatiques d'extraction de la poussière ;
- Stocker les ciments dans des silos équipés de systèmes automatiques pour prélever le matériau en vrac à partir du stock et le charger dans les camions-citernes ;
- Mettre en application des mesures pour assurer que des activités de maintenance et un bon entretien ménager s'effectuent régulièrement dans l'usine, afin de pouvoir limiter au minimum les fuites d'air et les déversements à petite échelle ;
- Manipuler les matériaux (par exemple, dans le cadre des opérations de concassage et de broyage des matières premières et pour la mouture du clinker) dans des systèmes fermés maintenus sous une pression négative par des ventilateurs aspirants. Collecter l'air de ventilation et retirer la poussière en utilisant des cyclones et des filtres à sac ;
- Recourir à des systèmes automatiques de remplissage et de manipulation des sacs, si possible [31], en prévoyant notamment de :
  - Utiliser une machine rotative de remplissage des sacs, munie d'un dispositif automatique d'alimentation en sacs en papier et de maîtrise des émissions fugitives ;
  - Disposer d'un système automatique de contrôle du poids de chaque sac déchargé ;
  - Se servir de bandes transporteuses pour acheminer les sacs vers la machine de palettisation ;
  - Installer les palettes terminées dans des baies couvertes, pour leur expédition ultérieure.

Pour les émissions de matières particulaires associées à l'exploitation des systèmes de fours, des refroidisseurs de clinker et des broyeurs, et également aux activités de brûlage du clinker et du calcaire, les techniques de prévention de la pollution et de dépollution

recommandées, qui s'ajoutent à la nécessité d'assurer la bonne marche des fours, consistent notamment à :

- Capturer les poussières des fours et des refroidisseurs en utilisant des filtres (voir **Fig IV.5**), et recycler les particules récupérées dans le flux d'alimentation du four et dans le clinker, respectivement ;
- Utiliser des précipitateurs électrostatiques (PES) ou des systèmes de filtres en tissu (filtres à sac) pour collecter et maîtriser les MP ;
- Diriger les gaz des refroidisseurs vers des cyclones dans un premier temps, pour en retirer les grosses particules, puis dans des filtres en tissu ;
- Récupérer la poussière des broyeurs en utilisant des filtres en tissu, et la recycler à l'intérieur des broyeurs.

#### **II.2.4. Les émissions de poussières**

Les émissions de poussières dans l'industrie cimentière proviennent essentiellement des fours, des refroidisseurs de clinker et des broyeurs à ciment. On peut ajouter à ces trois sources d'autres émissions de poussières dues au stockage des matériaux, aux broyeurs et à la gestion des matières premières.

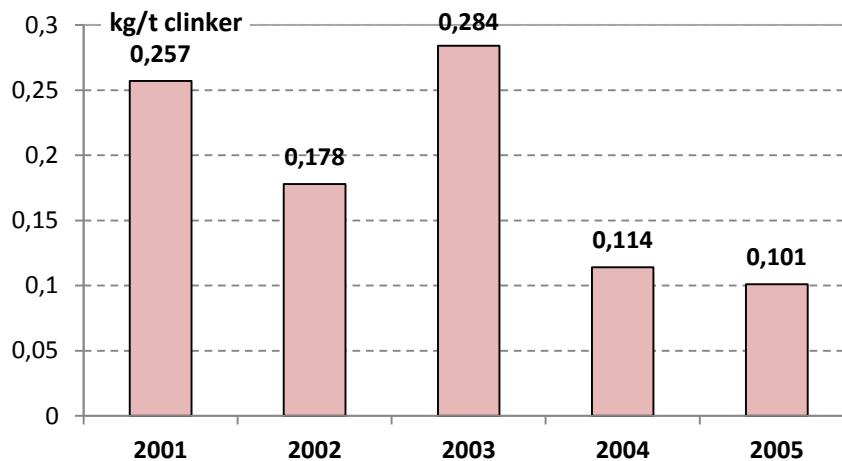
Pour ce problème d'émissions de poussières, depuis de nombreuses années, l'industrie cimentière a investi massivement dans des systèmes de dépoussiérage. Ainsi, des nouvelles cimenteries dans le monde sont aujourd'hui équipés des meilleures techniques disponibles en matière de systèmes de dépoussiérage des fumées que sont les "filtres à manches" et les "électro-filtres". Cette politique a permis de réduire d'une façon significative les émissions de poussières des sites cimentiers. Au niveau des fours à clinker, ces systèmes ont permis de réduire les émissions, en Europe, de plus de 80 % en cinq ans [32]. Par ailleurs, la réduction de ces émissions a évidemment un lien direct avec la diminution des émissions de poussières constatée aux alentours des cimenteries.

L'industrie cimentière est soumise, au niveau mondiale, à des normes toujours plus sévères en matière d'émissions de poussières. Ainsi, les valeurs limites applicables aux cheminées des fours à clinker qui étaient de 150 mg/m<sup>3</sup> en 1990 ont été ramenées à 50 puis maintenant à 30 mg/m<sup>3</sup>. Les appareillages qui équipent les fours actuellement permettent de respecter et même de descendre significativement en dessous de ces seuils (pour les autres installations tels les broyeurs et les refroidisseurs, la "VLE" applicable est de 50 mg/m<sup>3</sup>).

La réduction des émissions de poussières aux fours est particulièrement importante. En effet, les poussières ont la propriété de fixer certaines substances polluantes (comme certains métaux lourds). En réduisant les émissions de poussières, on limite donc également les émissions de ces polluants. Même si la relation n'est pas linéaire, la réduction des poussières permet de réduire en partie les émissions de microparticules inférieures à dix microns [27].

Notons que les poussières captées par les systèmes de dépoussiérage des fumées sont réinjectées dans le processus de fabrication du ciment ou incorporées directement dans le ciment.

La **Fig. II.3** montre un exemple des émissions de poussières pour une tonne de clinker produite dans une cimenterie dans la région de wallon en Europe, dont les données comprenant les émissions du four à clinker et des autres installations (broyeurs charbon, sécheur laitier,...etc.).



**Fig. II.3.** Émissions de poussières ramenées à la tonne de clinker produite [27]

L'augmentation des émissions de poussières en 2003 s'explique notamment par l'usure d'un électro-filtre dans cette cimenterie. Son remplacement par un filtre à manches à haute performance a permis de réduire, de façon très significative, les émissions de poussières de four dans cette usine. D'après les statistiques illustrées sur la **Fig. II.1**, ce remplacement, combiné à d'autres mesures prises sur d'autres fours (placement de nouveaux filtres à manches et rénovation d'anciens électro-filtres), a permis d'atteindre des valeurs particulièrement basses en 2004 et 2005.

### II.2.5. Les émissions de métaux lourds et autres polluants atmosphériques

Les combustibles et les matières premières contiennent toujours une certaine quantité de métaux [33]. Cette quantité qui dépend largement de leur provenance. La génération d'émissions de métaux lourds (par exemple, plomb, cadmium et mercure) peut être importante dans le cadre de la fabrication du ciment et provient de l'utilisation des matières premières, des combustibles fossiles et aussi des combustibles issus de déchets.

Les métaux non volatils sont principalement liés à la matière particulaire. Les émissions de métaux volatils, comme le mercure, sont habituellement issues des matières premières et des combustibles provenant de déchets, et ne peuvent pas être maîtrisées en utilisant des filtres [33].

Les métaux lourds et leurs composés sont généralement répartis en trois classes qui dépendent de leur volatilité ou de la volatilité de leurs composés les plus courants [33]. Les «VLE » sont définies pour chacune des classes suivantes :

- Le Mercure Hg ;
- Le Cadmium (Cd) et le Thallium (Tl) ;
- Les autres métaux lourds : Sb, As, Pb, Cr, Co, Ni, Cu, Mn, V.

Les analyses réalisées en 2004 et 2005 sur les matières premières, les combustibles et les émissions atmosphériques dans plusieurs cimenteries européennes montrent que les métaux lourds introduits dans les fours des cimenteries proviennent majoritairement du cru et non des combustibles [27].

Par ailleurs, les bilans massiques montrent que les taux de séquestration des métaux dans le ciment sont particulièrement élevés : de l'ordre de 87 % pour le mercure, 95 % pour le plomb et de plus de 99 % pour les autres métaux [33].

Ces résultats viennent confirmer les conclusions obtenues par d'autres analyses réalisées en 1996 [35]. Cela signifie que la grande majorité des molécules de métaux lourds introduites dans les fours à clinker se retrouvent dans le ciment, et cela sans compromettre la qualité des ciments et des bétons, ni la santé de ceux qui les utilisent.

Les techniques recommandées pour limiter les émissions de métaux lourds consistent, notamment, à :

- Surveiller et contrôler la teneur en métaux lourds volatils des matériaux et combustibles issus de déchets qui entrent dans le processus industriel, en mettant en application des pratiques sélectives pour l'utilisation des matériaux.
- Mettre en application des mesures d'atténuation efficaces de la poussière/MP pour réduire les émissions de métaux lourds non volatils, et gérer les déchets de matériaux capturés en tant que déchets dangereux. Dans certains pays, pour les concentrations élevées de métaux lourds volatils (particulièrement le mercure), le recours à l'absorption sur du charbon actif peut être imposé [34].
- Faire fonctionner les fours de manière contrôlée et régulière, pour éviter des arrêts d'urgence des précipitateurs électrostatiques (s'il en existe dans l'établissement) ;
- Les combustibles issus de déchets ne doivent pas être utilisés au cours de la phase de démarrage ou de fermeture.

Le **Tab. II.1** indique les valeurs de référence applicables aux émissions et aux effluents dans ce secteur. Les valeurs indiquées pour les émissions et les effluents industriels dans cette branche d'activité correspondent aux bonnes pratiques internationales dans ce domaine, telles qu'exprimées par les normes pertinentes des pays qui ont des cadres réglementaires reconnus [36]. Les valeurs indiquées au **Tab. II.1** doivent être relevées, pour des effluents

non dilués, pendant au moins 95 % du temps d'exploitation de l'usine ou de l'unité considérée, calculé sur la base du nombre annuel d'heures d'exploitation [36].

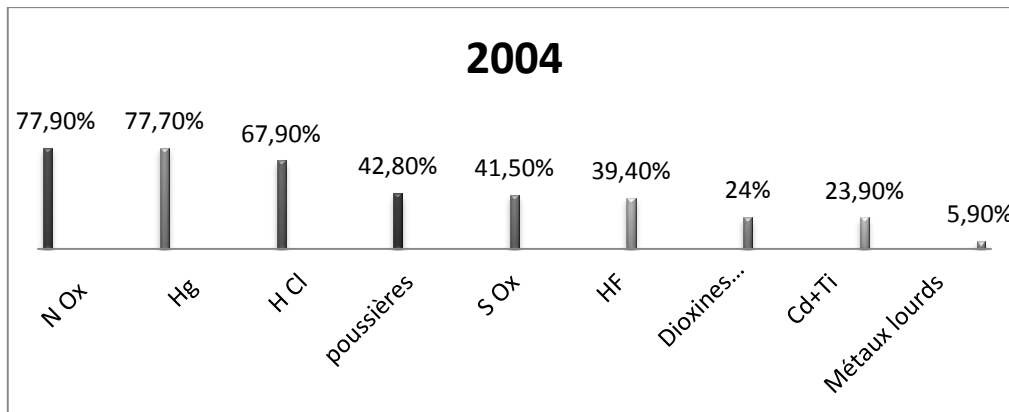
**Tab. II.1.** niveau des émissions atmosphériques pour la fabrication du ciment [36]

Polluants	Unités	Valeurs selon les directives
Matières particulaires (nouveau système de four)	mg/m <sup>3</sup>	30 <sup>a</sup>
Matières particulaires (fours existants)	mg/m <sup>3</sup>	100
Poussière (autres sources ponctuelles dont le refroidissement du clinker, le broyage du ciment)	mg/m <sup>3</sup>	50
SO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	400
NOX	mg/m <sup>3</sup>	600
HCl	mg/m <sup>3</sup>	10 <sup>b</sup>
Fluorure d'hydrogène	mg/m <sup>3</sup>	1 <sup>b</sup>
Carbone organique total	mg/m <sup>3</sup>	10
Dioxines/furannes	mg Téq/m <sup>3</sup>	0.1 <sup>b</sup>
Cadmium et thallium (Cd+Ti)	mg/m <sup>3</sup>	0.05 <sup>b</sup>
Mercure(Hg)	mg/m <sup>3</sup>	0.05 <sup>b</sup>
Métaux totaux <sup>c</sup>	mg/m <sup>3</sup>	0.5
<p><b>Note:</b>  * émissions de la cheminée du four, sauf indication contraire. Valeurs moyennes journalières corrigées à 273 K, 101.3 KPa, 10 % d'O<sub>2</sub>, et gaz sec, sauf indication contraire.  <sup>a</sup> 10 mg/Nm<sup>3</sup> si plus de 40 % de la libération de chaleur résultante provient de déchets dangereux.  <sup>b</sup> si plus de 40 % de la libération de chaleur résultante provient de déchets dangereux, valeurs moyennes sur la période d'échantillonnage de 30 minutes minimum et 8 heures maximum.  <sup>c</sup> Métaux totaux = Arsenic (As), plomb (Pb), cobalt(Co), chrome (Cr), cuivre (Cu), manganèse (Mn), nickel (Ni), vanadium (V) et antimoine (Sb).</p>		

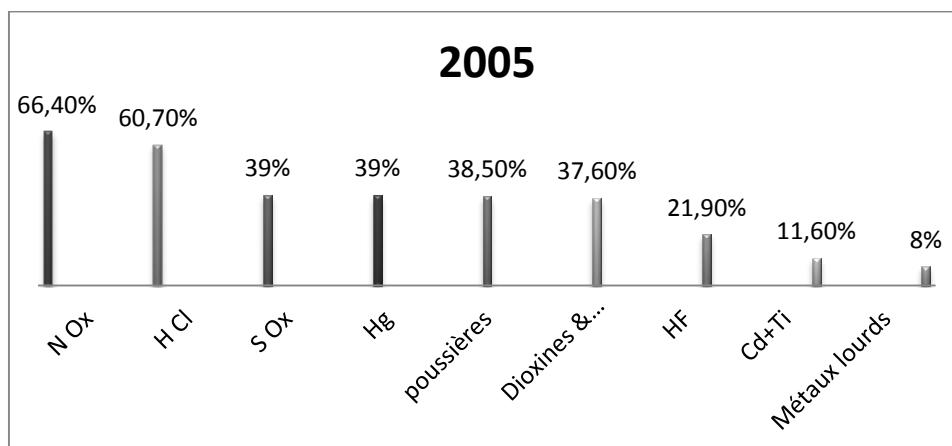
### II.2.6. Les émissions à la cheminée

Les émissions de poussières et des polluants aux cheminées ont longtemps constitué une des principales sources de nuisances pour les riverains. Voilà pourquoi, les cimentiers ont réalisé, pour les poussières comme pour d'autres polluants, beaucoup d'efforts ces dernières années. Elle doivent donc particulièrement bien suivies et contrôlées.

Les histogrammes ci-dessous (Figs. II.4 et II.5) donne un exemple d'une étude réalisée en Europe sur l'ensemble des émissions aux cheminées durant l'année 2004 et 2005 [27].



**Fig. II.4.** Synthèse des émissions aux cheminées en 2004  
Emissions du secteur cimentier européen exprimées en % des valeurs limites d'émission ramenées à une base annuelle Métaux lourds [27]



**Fig. II.5.** Synthèse des émissions aux cheminées en 2005  
Emissions du secteur cimentier européen exprimées en % des valeurs limites d'émission ramenées à une base annuelle Métaux lourds [27]

## II.3. Consommation énergétique

### II.3.1. Introduction

L'industrie cimentière est fortement consommatrice en énergie calorifique et électrique. Les besoins mondiaux en énergie pour la fabrication du ciment sont estimés à environ 6,109 GJ/an pour les combustibles et 200 TWh/an pour l'électricité [37]. Par ailleurs, l'énergie représente 30 à 40 % du prix de revient d'une tonne du ciment.

Par ailleurs, les consommations spécifiques varient beaucoup d'une usine à l'autre et selon les pays considérés (entre 3000 et 8000 kJ/tonne de clinker pour la consommation calorifique, et entre 70 et 160 kWh/tonne de ciment pour la consommation d'électricité) [37].

### II.3.2. Les besoins calorifiques

Les besoins calorifiques sont essentiellement liés à la cuisson des matières premières dans le four, les matériaux devant être portés à une température de l'ordre de 1450 à 1500 °C.

Des besoins calorifiques annexes sont cependant nécessaires pour assurer le séchage des produits d'addition (argile, laitier,...etc.) qu'il faut mieux protéger des intempéries [38]. Les besoins calorifiques dépendent principalement des facteurs suivants :

- Type de procédé utilisé (voir **Tab. II.2**);
- Conception des équipements (la récupération thermique dépend d'équipements tels que : refroidisseur, nombre d'étages du préchauffeur,...etc.);
- Fiabilité de fonctionnement des lignes de cuisson (des arrêts fréquents des lignes de cuisson, attribuables à des incidents, entraînent des surconsommations calorifiques importantes).

**Tab. II.2.** Consommation énergétique moyenne des procédés cimentiers [38]

Procédé	Capacité maximale (t/jour)	Consommation calorifique (MJ/t clinker)	Consommation électrique (kWh/t ciment)
<b>Voie humide</b>	3000	6400 (4931/7960)	120 (94.3/157.6)
<b>Voie semi-sèche</b>	2320	3900 (3210/4010)	106 (95.5/149.8)
<b>Voie sèche - fours longs</b>	3270	4530 (3133/4997)	135 (113.3/176.1)
<b>Voie sèche - fours à préchauffeurs sans précalcinateur</b>	3800	3836 (3125/4550)	110 (95/159.5)
<b>Voie sèche - fours à préchauffeurs à précalcinateur AT (air through)</b>	2740	3750 (3346/4029)	110 (96.2/143.5)
<b>Voie sèche- fours à préchauffeurs à précalcinateur AS (air séparé)</b>	7600	3430 (3008/4230)	110 (70.7/150.6)
<b>N.B :</b> étant donné qu'il s'agit de valeurs moyennes (valeurs extrêmes données entre parenthèses), ces valeurs ne peuvent être comparées à celles qui sont données par les constructeurs. Seules ces dernières devraient être considérées comme des objectifs à atteindre pour des installations neuves.			

Les principaux combustibles utilisés pour la cuisson du clinker dans le monde sont le charbon (utilisé à environ 50 % de la valeur calorifique consommée [39]), certains déchets le fioul lourd et le gaz.

Depuis une décennie, la part des combustibles traditionnels, tels que le charbon, le fioul et le gaz, tend à être réduite au profit d'autres combustibles plus attrayants du point de vue économique, tels que le coke de pétrole, les déchets, et la biomasse (dont les farines animales).

Les combustibles de substitution peuvent poser des problèmes d'utilisation vis-à-vis du procédé ou de la qualité, liés principalement aux composants chimiques qu'ils contiennent. Leur utilisation est donc limitée. Par exemple, le soufre des cokes de pétrole peut entraîner des perturbations dans l'atelier de cuisson. En revanche, il ne constitue généralement pas de problème vis-à-vis de l'environnement, car le soufre introduit par les combustibles se retrouve dans le clinker (et donc n'est pas émis dans l'atmosphère) pour des lignes de cuisson équipées de fours à préchauffeurs (ce n'est pas le cas des autres types de fours).

La solution idéale pour réduire la consommation calorifique est de disposer d'un procédé en voie sèche, avec ou sans précalcination, doté de préchauffeurs à cinq ou six étages et de refroidisseurs à grilles [38]. Toutefois, le nombre d'étage est conditionné par l'humidité du cru: il faut que la température des gaz en sortie du four soit suffisante pour en assurer le séchage.

### **II.3.3. Les besoins électriques**

La consommation électrique varie entre 70,7 et 159,5 kWh/tonne de ciment [40]. Elle est liée principalement au broyage des matières premières et du clinker. Le **Tab. II.3** ne met que très partiellement en évidence l'intérêt énergétique de certains procédés de broyage par rapport à d'autres. Ceci vient de multiples raisons telles que :

- L'extrême diversité des produits à broyer : en particulier pour le ciment, la finesse recherchée (la consommation électrique en dépend) est fonction de la qualité du ciment recherchée, et de la qualité du clinker broyé;
- L'installation de façon très rentable des séparateurs à haute performance sur des ateliers de broyage en "circuit ouvert" [41];
- etc.

Il est à noter que les ventilateurs sont également de gros consommateurs d'énergie électrique. À titre d'exemple, la puissance du ventilateur principal installé sur un broyeur vertical est du même ordre de grandeur que celle du moteur du broyeur [42] (voir **Fig. II.6**).

La consommation électrique dépend aussi de la qualité de l'ingénierie mise en œuvre pour la conception de la ligne de production (usine en "ligne" avec un nombre limité de transporteurs, transport par convoyeurs plutôt que pneumatique, ...etc.).



Le manque de fiabilité des équipements est un facteur important de surconsommation électrique, en fonction de la fréquence et de la durée des arrêts et redémarrages (les ventilateurs ne sont pas arrêtés lors d'arrêts momentanés, par exemple).

**Tab. II.3.** Consommation énergétique du cru et du ciment [38].

Procédé	Consommation électrique moyenne (kWh/t)
<b>Broyage « cru »</b>	
Boulets, voie humide	20 (7/29.6)
Boulets, circuit ouverts	22 (21.9/26.7)
Boulets, circuit fermés (équipés de séparateurs)	24 (24.2/40.6)
Vertical	19 (18.6/32.2)
<b>Broyage ciment</b>	
Boulets, circuit ouverts	46 (26/93)
Boulets, circuit fermés (équipés de séparateurs)	51 (28/128)
Presse (en pré broyage) + boulets	42 (29.6/64.1)
Horomill	37 (28.5/39.6)
<b>N.B:</b> Les valeurs indiquées sont des valeurs moyennes (valeurs extrêmes données entre parenthèse) définies à partir de nombreuses usines installées à travers le monde.	

La production d'électricité étant souvent réalisée par des centrales thermiques brûlant des combustibles minéraux tels que le charbon, ou pétroliers (fuel-oil, gaz). Toute économie dans la consommation d'électricité permet de réduire la facture énergétique, mais aussi les émissions de gaz à effet de serre liées à la production d'électricité [43].

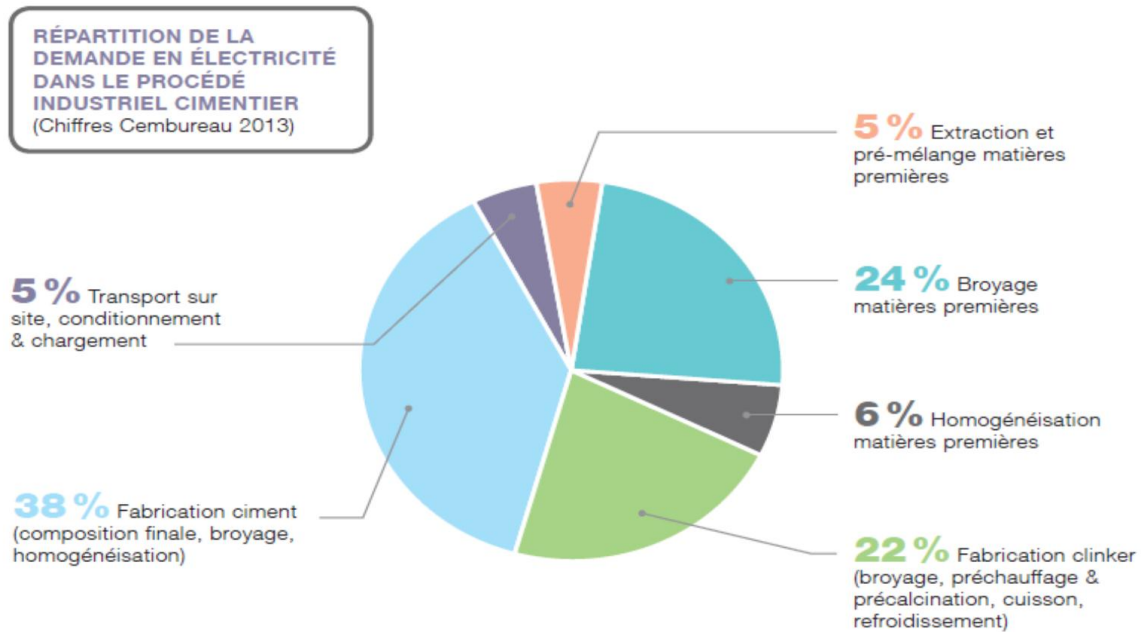


Fig. II.6. Répartition de la demande en électricité dans le procédés industriel cimentier [43]

#### II.3.4. Les sources d'économie d'énergie

Des réductions importantes de consommation calorifique ont été obtenues durant les vingt à trente dernières années par, en particulier, l'abandon du procédé à "voie humide" dans les pays industrialisés. Les lignes de production réalisées depuis une quinzaine d'années (jusqu'à 7000 tonnes par jour de clinker pour les plus récentes installées dans le sud-est asiatique) sont énergétiquement performantes [44]. Les anciennes unités de production de petite capacité peu performantes ont été progressivement remplacées par des lignes de plus grosse capacité présentant de bonnes performances énergétiques; quant aux unités de moyenne capacité, elles peuvent être généralement rénovées.

Malgré la modernisation constante de son procédé, l'industrie cimentière demeure une industrie énérgo-intensive : l'énergie constitue 30 % du coût de revient de la production d'une tonne de ciment [40].

L'optimisation permanente de la récupération d'énergie thermique sur l'ensemble du process (préchauffage du cru et de l'air de combustion, pré-calcination) et des installations existantes (systèmes d'automatisation de pointe, technologies de contrôle de production et d'équipements auxiliaires affinées) ne laissent plus qu'une part minime à des progrès obtenus par des moyens conventionnels.

Parmi ceux-ci, la possibilité de récupérer, dans certains cas, la chaleur résiduelle basse température du procédé pour la transformer en énergie électrique, réutilisée ensuite dans le process même [41]. Cette démarche exige un investissement initial lourd et une longue période d'amortissement, en fonction du coût de l'électricité. Cette piste serait facilitée par l'instauration d'un mécanisme de soutien semblable aux Certificats d'économies d'énergie.

## **II.4. La valorisation énergétique**

Les cimentiers sont de grands consommateurs d'énergie. Heureusement, le processus de fabrication des ciments permet d'utiliser des combustibles de substitution en remplacement des combustibles fossiles (coke de pétrole, charbon, fioul lourd,...etc). C'est ce qu'on appelle la valorisation énergétique.

Les besoins en énergie des cimentiers sont connus : il faut entre 3000 et 4200 MJ pour fabriquer une tonne de clinker en voie sèche, environ 6000 MJ en voie humide et 8000 MJ pour le ciment blanc-auxquels s'ajoutent encore 324 à 468 kWh d'énergie électrique lors de la mouture du ciment [37]. Ceci explique le souci permanent des cimentiers en matière d'amélioration de leur efficacité et ce afin de réduire la consommation d'énergie par tonne de ciment.

Les cimentiers utilisent aujourd'hui de nombreux combustibles de substitution en lieu et place des combustibles fossiles classiques. On peut répartir ces combustibles de substitution en deux catégories distinctes :

- *La « biomasse »* : boues séchées issues des stations d'épuration, vieux papiers, sciures de bois, farines et graisses animales...etc.

- *Les déchets* : pneus déchiquetés, bois de palettes, résidus de broyage automobile, huiles usagées, plastiques, solvants, ...etc.

### **II.4.1. Comment les déchets sont-ils utilisés pour produire du ciment ?**

En raison de leurs atmosphères fortement alcalines et des températures élevées des flammes (jusqu'à 2000 °C), les fours à ciment ont la capacité d'utiliser des combustibles issus de déchets à haute valeur calorifique (par exemple; des solvants usés, de l'huile usagée, des pneus, des déchets de plastiques et des déchets chimiques organiques, les pesticides organochlorés désuets et d'autres matériaux chlorés). Alors, à l'heure actuelle, dans les pays développés, les fours à ciments sont alimentés par des combustibles fossiles et des déchets [45]. Si l'on ajoutait une tonne de déchets supplémentaire à ce processus, la quantité totale de ciment produit n'augmenterait pas, la tonne de déchets venant en effet simplement se substituer à une partie des combustibles fossiles et des matières premières nécessaires.

L'ajout d'une tonne de déchets modifierait légèrement l'ensemble des émissions atmosphériques ainsi que la composition du clinker, en fonction des éléments présents dans les déchets et du type de combustible fossile qu'ils remplacent. Par exemple, si les déchets contiennent moins de soufre que le combustible fossile qu'ils remplacent, les émissions de soufre dans l'atmosphère diminueront, ce qui entraînera moins de pluies acides [27].

### **II.4.2. Quel traitement est le moins nocif pour l'environnement ?**

Pour la grande majorité des impacts environnementaux, l'étude démontre qu'il est moins nocif pour l'environnement d'utiliser les déchets industriels comme combustible de

substitution pour la production de ciment que de les traiter dans des incinérateurs de déchets.

Pour les deux méthodes de traitement, l'utilisation d'une tonne de déchets produit une énergie qui aurait été fournie par d'autres sources sans l'ajout de cette tonne de déchets, notamment par des combustibles fossiles qui contribuent au réchauffement de la planète.

Les déchets et les combustibles fossiles contiennent une certaine quantité d'énergie (exprimée en mégajoules ou MJ). Dans le cas des fours à ciment, la combustion d'un MJ de déchets est aussi efficace que la combustion d'un MJ de combustible fossile [27]. Par contre, les incinérateurs de déchets sont énergétiquement bien moins performants que les centrales électriques fonctionnant aux combustibles fossiles en termes de production d'électricité et de vapeur, car seule une petite partie de l'énergie est récupérée [46]. Par conséquent, utiliser les déchets comme combustible de substitution pour la production de ciment permet d'épargner d'avantage de combustibles fossiles.

En général, brûler des déchets génère des cendres. Dans la production de ciment, ces cendres sont incorporées au produit final, remplaçant de la sorte certaines matières premières qui autrement auraient été ajoutées au produit [27]. Dans le cas de l'incinération, on se débarrasse de ces cendres dans des sites d'enfouissement des déchets.

#### **II.4.3. Utilisation des ressources et production de déchets**

Les tableaux ci-dessous (Tabs. II.4, II.5 et II.6) fournissent des exemples relatifs à l'utilisation des ressources et à la production de déchets dans l'industrie cimentaire ; ils peuvent être considérés comme indicateurs d'efficacité et utilisés pour se tenir au courant des changements de performance qui interviennent au fil du temps.

**Tab. II.4.** *consommation de ressources et d'électricité [38]*

<b>Entrants par unité de produit</b>	<b>Unité</b>	<b>Référence de l'industrie</b>
<b>Combustible - ciment</b>	GJ/t de clinker	3,0 - 4,2 a, b, c, d, g
<b>Electricité - ciment</b>	kWh/t d'éq ciment	90 - 150 a, b, c
<b>Electricité - broyage du clinker</b>	kWh/t	40 - 45
<b>Matériaux:</b> Matières premières de substitution utilisées pour la production de clinker	%	2 - 10 a, f, h
Matières premières de substitution utilisées pour la production de ciment	%	0 - 70/80 avec laitier de haut fourneau ≥ 0 - 30 avec cendres volantes
<b>NOTE :</b> se reporter au <b>Tab. II.5</b> pour les notes et les sources		

Tab. II.5. Volume d'émission et de production de déchets [38]

Entrants par unité de produit	Unité	Référence de l'industrie
<b>Déchets</b>	kg/t	0,25 - 0,6 <sup>a</sup>
<b>Emissions</b>		
Poussières	g/t d'éq ciment	20 - 50 <sup>a</sup>
NO <sub>x</sub>	g/t d'éq ciment	600 - 800 <sup>b</sup>
SO <sub>x</sub>	kg/t	0,1 - 2,0 <sup>a, h</sup>
CO <sub>2</sub> provenant de la décarbonatation	kg/t	400 - 525 <sup>a, e, f, h, k</sup>
CO <sub>2</sub> provenant du combustibles <sup>i</sup>	kg/t d'éq ciment	150 - 350 <sup>a, e, f, h</sup>
<sup>a</sup> Buzzi- Unicem (2004) <sup>b</sup> IPPC <sup>c</sup> Ernest Orlando Lawrence, Berkeley National Laboratory (2004) <sup>d</sup> NRCan <sup>e</sup> CIF <sup>f</sup> Italcementi Group (2005) <sup>g</sup> Environment Canada (2004) <sup>h</sup> Lafarge (2004) <sup>i</sup> Influence par les quantités variables de cendres volantes et d'autres additives utilisés. <sup>j</sup> Les émissions de CO <sub>2</sub> produites par l'incinération des déchets (provenant au moins de la partie biodégradable) sont considérées comme neutres dans plusieurs pays. <sup>k</sup> World Business Council on Sustainable Development, Cement Sustainability Initiative.		

Tab. II.6. Consommation de chaleur et capacité de production pour les fours de fabrication du ciment [38]

Type de four	Consommation d'énergie (MJ/t de clinker)	Capacité de production maximale (t/jour)
<b>Four de préchauffage/précalcination 3 - 6 stades</b>	3000 - 3800 <sup>a</sup>	12000
<b>Four de préchauffage</b>	3100 - 4200	4000
<b>Four long par voie sèche</b>	≤ 5000	3800
<b>Four long par voie semi-sèche, semi-humide</b>	3300 - 4500	2500
<b>Processus par voie humide</b>	5000 - 6000	1500 - 2000
<b>NOTE :</b> <sup>a</sup> un four de préchauffage / précalcination en six stades peut atteindre 2900 MJ/t de clinker dans des conditions optimales. Source : IPPC (2001)		

## **II.5. Conclusion**

L'énergie représente une partie importante du prix de revient de la fabrication du ciment. La volonté affirmée de réduire les émissions atmosphérique participe également à la nécessité d'améliorer les performances énergétiques des cimenteries, qu'il s'agisse d'énergie calorifique ou électrique.

Le dérèglement climatique est reconnu par tous. L'urgence de mettre en place des solutions innovantes pour réduire ces émissions est une priorité absolue. L'efficacité énergétique doit être au cœur des efforts d'innovation. L'efficacité énergétique désigne les technologies qui permettent de produire les mêmes bien ou services en utilisant le moins d'énergie possible. Et qui dit moins d'énergie consommée dit aussi moins de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz émis.

De nombreux défis attendent les industries, dont la protection de l'environnement, réchauffement climatique et sécurité énergétique.

# Chapitre III

## *La chaîne de production à la cimenterie de Béni-Saf*

### Sommaire du chapitre

#### **III.1. Introduction**

#### **III.2. Présentation de la cimenterie de Béni-Saf**

##### **III.2.1. L'histoire de la Cimenterie**

##### **III.2.2. Les différents services de production à la SCIBS**

###### **III.2.2.1. Sous-direction exploitation**

###### **III.2.2.2. Sous-direction maintenance**

##### **III.2.3. La capacité de production**

#### **III.3. La fabrication du ciment à la SCIBS**

##### **III.3.1. Le ciment produit**

##### **III.3.2. Les composantes chimiques et minéralogiques du ciment**

##### **III.3.3. Processus de fabrication du ciment à la SCIBS**

###### **III.3.3.1. Extraction de la matière première**

###### **III.3.3.2. Préparation du cru**

###### **III.3.3.3. Broyage du cru**

###### **III.3.3.4. Homogénéisation**

###### **III.3.3.5. Cuisson**

###### **III.3.3.6. Stockage du clinker**

###### **III.3.3.7. Broyage du ciment**

###### **III.3.3.8. Stockage, ensachage et expédition**

#### **III.4. Problèmes écologique et économique dans la cimenterie de Béni Saf**

##### **III.4.1. Problème écologique**

###### **III.4.1.1. Types de polluants rejetés dans l'atmosphère**

###### **III.4.1.2. Les menaces écologiques de la cimenterie de Béni Saf**

##### **III.4.2. Problème économique**

**III.5 Conclusion**



## Chapitre III

# ***La chaîne de production à la cimenterie de Béni-Saf***

### **III.1. Introduction**

La cimenterie de Béni Saf représente une société industrielle parmi les grandes industries dans le pays, elle est devenue l'une des plus performantes unités de production, dans son domaine, en Algérie et ceci en termes de capacité de production et de distribution qui couvre une bonne partie du territoire national.

Sur la base de ce qui a été investiguer dans les deux chapitres précédents, l'exemple de la cimenterie de Béni Saf fait l'objet de notre recherche.

Alors, ce chapitre présente la cimenterie de Béni Saf avec les différents services de production au sein de cette entreprise, sa capacité de production, le processus de fabrication, de l'extraction jusqu'à l'expédition, ainsi les enjeux de l'impact sur l'environnement et la grande consommation énergétique, en outre, cette partie de document représente le rapport de notre stage au sein de l'entreprise SCIBS.

### **III.2. Présentation de la cimenterie de Béni-Saf**

#### **III.2.1. L'histoire de la Cimenterie**

La cimenterie de Béni-Saf a été réalisée, dans le cadre du plan de développement quinquennal des années 70, par la Société Nationale des Matériaux de Construction (SNMC) entre 1974 et 1978. Elle est entrée en production en novembre 1978. Le 1<sup>er</sup> sac de ciment est sorti en février 1979.

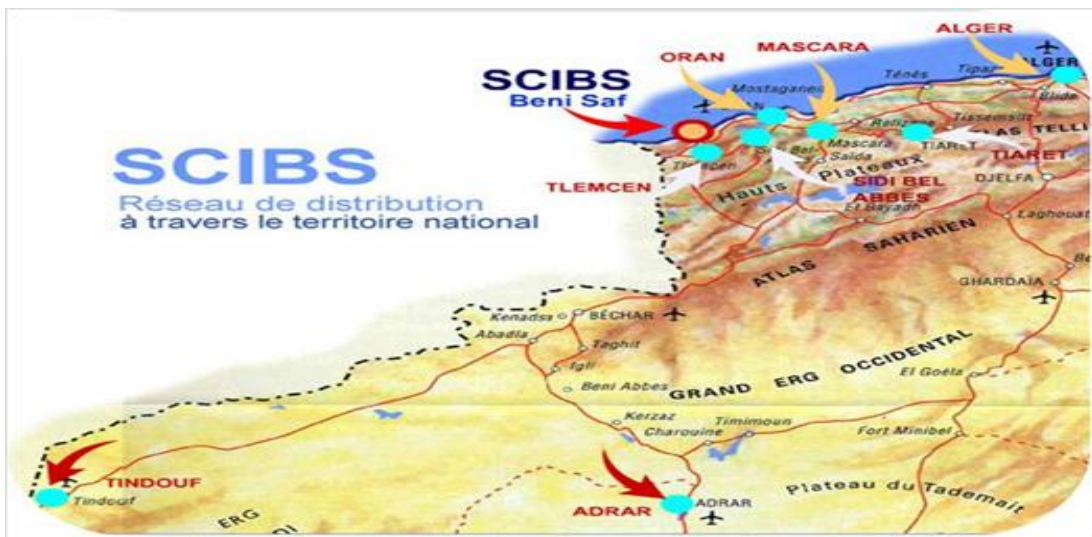
En 1982, la SNMC a été transformée en quatre Entreprises régionales appelées Entreprises des Ciments et dérivés (ERCO pour l'ouest, ECDE pour Echlef, ERCC pour le centre et ERCE pour l'est) qui ont subies à leur tour plusieurs transformations juridiques : en SPA en 1989 puis en GROUPE Industriel et Commercial (GIC) en 1997. [11]

La cimenterie de Béni-Saf a été constituée en SPA, appelé Société des Ciments de Béni-Saf (par abréviation S.CI.BS) avec pour actionnaire unique le Groupe ERCO en décembre 1997.

Les investissements importants, répondant aux exigences de fabrication, réalisés depuis l'entrée en production de la cimenterie de Béni-Saf, sont les suivants :

- Pour améliorer la capacité de stockage et de mise à disposition du produit, la société a procédé à l'acquisition, le montage et la mise en service d'une chaîne de fardélisation avec housseuses en plastique (palettiseur de 3 types de fardeaux sans palette de 1700, 1800 ou 2200 kg chacun et enveloppés dans 2 couches de plastique thermo rétractable).
- la S.CI.BS a réorganisé ses installations pour augmenter l'efficacité de son usine;
- En juillet 2005, la S.CI.BS réalise son partenariat et signe un contrat de management sur 10 ans avec le Groupe PHARAON. À partir de cette date, la société est gérée au titre d'un mandat de gestion par Pharaon Commercial Investment Group Limited.
- Actuellement, l'effectif total est de 500 agents ; la production annuelle atteint 1 100 000 tonnes de clinker et 1 250 000 tonnes de ciment expédié. [11]

La cimenterie couvre une bonne partie du territoire national (voir **Fig.III.1**). La SCIBS nourrit la conviction que sa performance ne peut être durable que si elle associe rentabilité économique, qualité environnementale, écoute et amélioration des conditions de vie des communautés dans lesquelles le groupe opère. Le développement durable vise à assurer le succès de l'entreprise à long terme. Fondée sur le dialogue et le partenariat-Ouverture, dialogue et partenariat sont les piliers de l'approche du développement durable chez SCIBS. [11]



**Fig. III.1.** Réseau de distribution de la SCIBS

### III.2.2. Les différents services de production à la SCIBS

La direction de production à la société de ciments de Béni-Saf est chargée de la production et de la gestion de production, elle est divisée en deux sous-directions:

- Sous-direction exploitation

- Sous-direction maintenance

### **III.2.2.1. Sous-direction exploitation**

Chargée de la fabrication du produit, le suivi du processus de production et l'exploitation de la matière première. Elle comprend deux sous-départements:

#### ➤ ***Département fabrication***

Ce département comprend les quatre services:

- Service fabrication
- Service exploitation
- Service environnement
- Service laboratoire

#### ➤ ***Département matière première***

Il comprend deux services:

- Service matière première
- Service entretien engins roulants

### **III.2.2.2. Sous-direction maintenance**

Elle gère les problèmes de la maintenance et de l'investissement et comprend deux départements:

- Département maintenance
- Département bureau d'études et méthodes

#### ➤ ***Département maintenance***

Il assure l'exécution des travaux de maintenance de toutes les installations de la cimenterie, en assurant les ensembles des opérations de dépannage et d'entretien. Les services de ce département sont:

- Service mécanique d'entretien
- Service électrique
- Service utilités
- Service de contrôle, mesure et régulation (C.M.R)

#### ➤ ***Département bureau des méthodes***

Il est chargé de la gestion, étude, préparation, ordonnancement et lancement. Il comprend les services suivants [12]:

- Service magasin général (Gestion de stock)
- Service approvisionnement
- Service visite
- Service méthodes
- Service étude et réalisation

L'atelier de mécanique est lié directement au service d'études, il est chargé d'exécution des ordres de travail et comprend deux sections:

- Section usinage
- Section chaudronnerie

Le département bureau des méthodes gère encore les tâches suivantes:

- Rapport de visite;
- Fiche d'incidents.

Toute information ramenée par d'autres structures sont prises en charge et exploitées. Le bureau des méthodes doit établir un programme de travail selon le modèle ci dessous:

- Lancement des travaux en urgence;
- Programme hebdomadaire;
- Programme grand arrêt.

Tout ordre de travail doit être saisi en cas de problème dans un dispositif répétitif, on a recourt à l'historique pour mieux étudier le problème [12]. L'organigramme actuel de l'entreprise est représenté selon la **Fig.III.2**

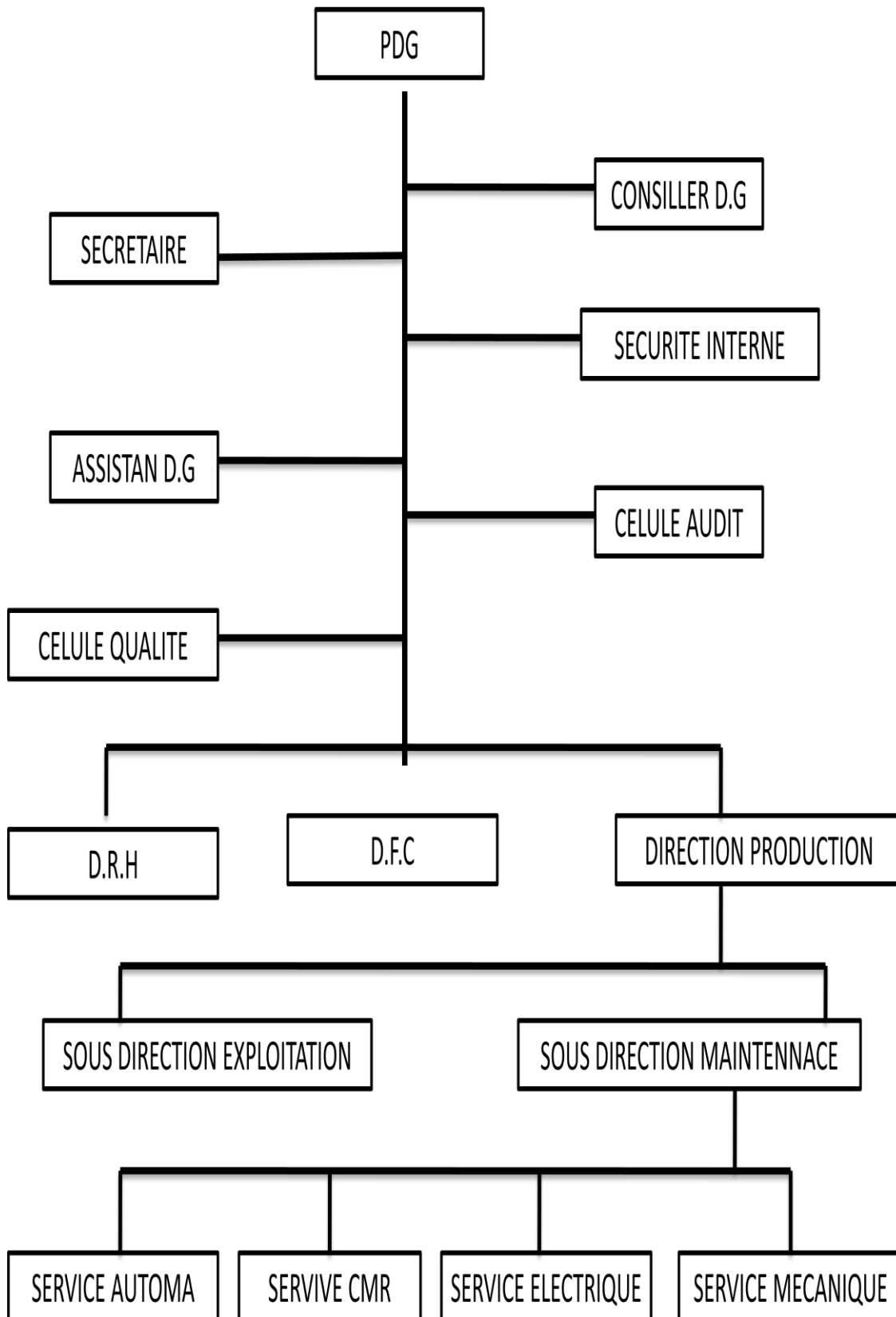


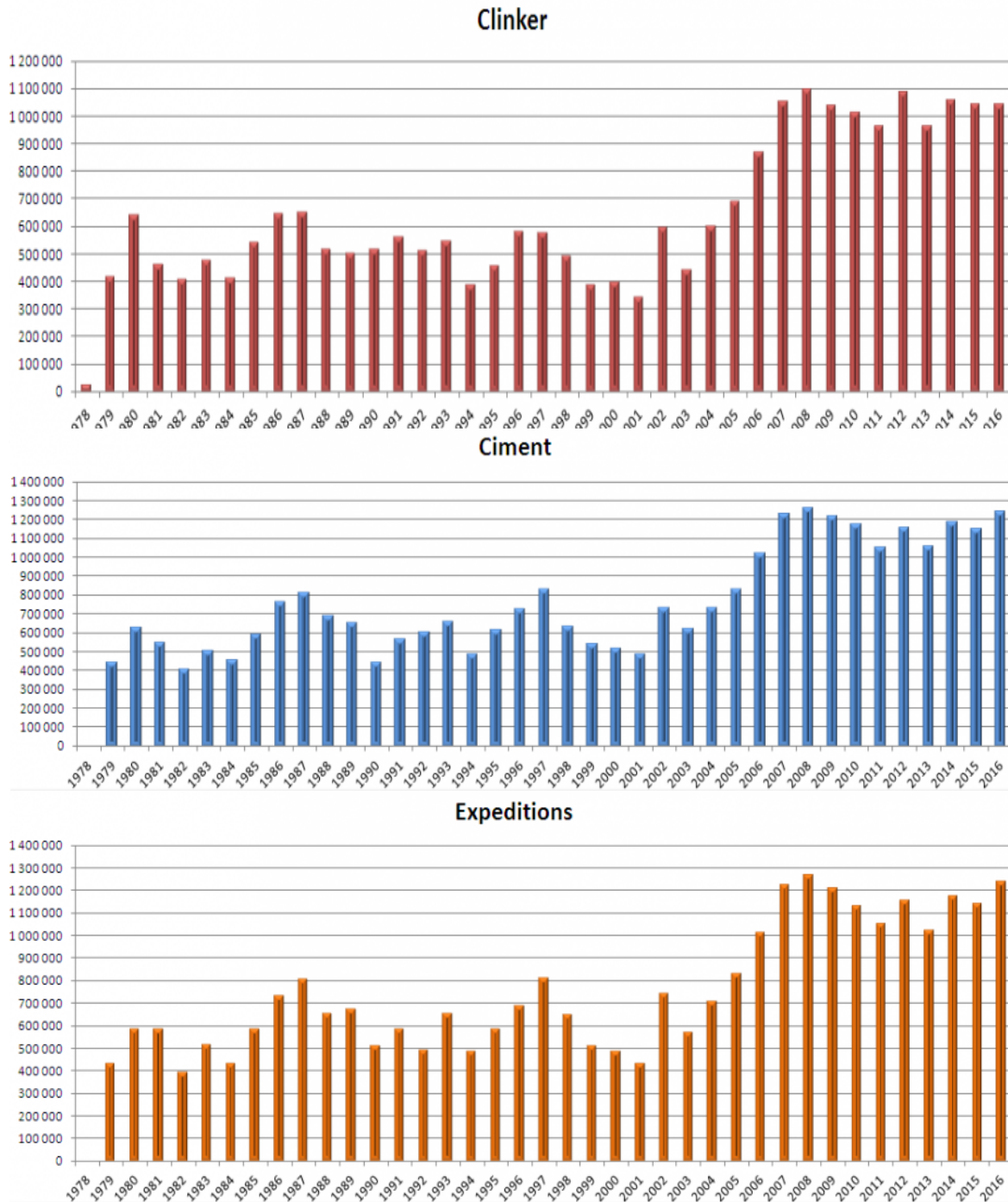
Fig.III.2. Organigramme de l'entreprise

### III.2.3. La capacité de production

La capacité de production de cette usine est passée à plus de 1 200 000 de tonnes de ciments en 2016 (voir **Tab III.1**) et ainsi elle à pulvériser les records d'expédition des exercices antérieurs. Cette performance vient confirmer le bien fondé de la stratégie adoptée par la SCIBS (voir **Fig.III.3**) [11].

**Tab.III.1.** *Historique Production/Expédition du ciment depuis 1978*

<b>Année</b>	<b>Clinker (Tonne)</b>	<b>Ciment (t)</b>	<b>Expédition (t)</b>
1978	25 303	0	0
1980	640 252	632 202	586 676
1985	542 483	585 731	586 610
1990	500 692	436 328	512 632
1995	455 131	607 663	586 142
1998	491 572	626 356	650 280
2000	396 093	509 751	488 990
2003	442 946	612 734	571 995
2005	691 246	824 005	831 352
2008	1 097 090	1 294 140	1 268 973
2010	1 012 315	1 163 302	1 128 886
2012	1 063 841	1 147 385	1 154 409
2014	1 054 197	1 176 809	1 176 270
2015	1 043 012	1 138 178	1 158 950
2016	1 043 600	1 229 492	1 230 672



**Fig.III.3.** les statistiques de fabrication du clinker, du ciment, ainsi que d'expédition du ciment dans la cimenterie de BENI SAF [11]

### III.3. La fabrication du ciment à la SCIBS

#### III.3.1. Le ciment produit

Le ciment produit par la cimenterie de Béni Saf est un ciment portland composé à la pouzzolane naturelle de la classe CPJ-CEM II/A 42,5 selon la norme NA 442/2000 est constitué de :

- Minimum de 80-94 % de clinker
- 6-20 % de la pouzzolane naturelle

#### III.3.2. Les composantes chimiques et minéralogiques du ciment de Béni Saf

##### ▪ *Clinker portland*

Est un matériau hydraulique constitué d'au moins deux tiers, en masse, de silicates de calcium  $C_3S$  et  $C_2S$  la partie restante contenant des silicates d'aluminium et de fer  $C_3A$ ,  $C_4AF$  et d'autres oxydes.

Le clinker portland est obtenu par cuisson d'un mélange homogène de farine crue contenant  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  et de petites quantités d'autres matières.

##### ▪ *Pouzzolane naturelle*

Est une substance d'origine volcanique (pierre ponce) composée essentiellement de  $SiO_2$  ; réactif, de  $Al_2O_3$ , de  $Fe_2O_3$  et ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. [14]

##### ▪ *Sulfate de calcium*

Le sulfate de calcium sous forme de gypse est ajouté à raison de 5 % aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication, en vue de réguler la prise. [14]

##### ▪ *Additif*

Un adjuvant ou agent de mouture destiné à favoriser le broyage du ciment est ajouté au cours du broyage ciment. [14]

#### III.3.3. Processus de fabrication du ciment à la SCIBS

Le processus comprend huit grandes étapes dans la cimenterie de Béni-Saf:

- Extraction de la matière première
- Préparation du cru (concassage et pré-homogénéisation)
- Broyage du cru
- Homogénéisation
- Cuisson
- Stockage du clinker
- Broyage du ciment
- Stockage, ensachage et expédition

Dans ce qui suit, on présente des détails sur les différentes étapes procédées à la cimenterie de Béni Saf.



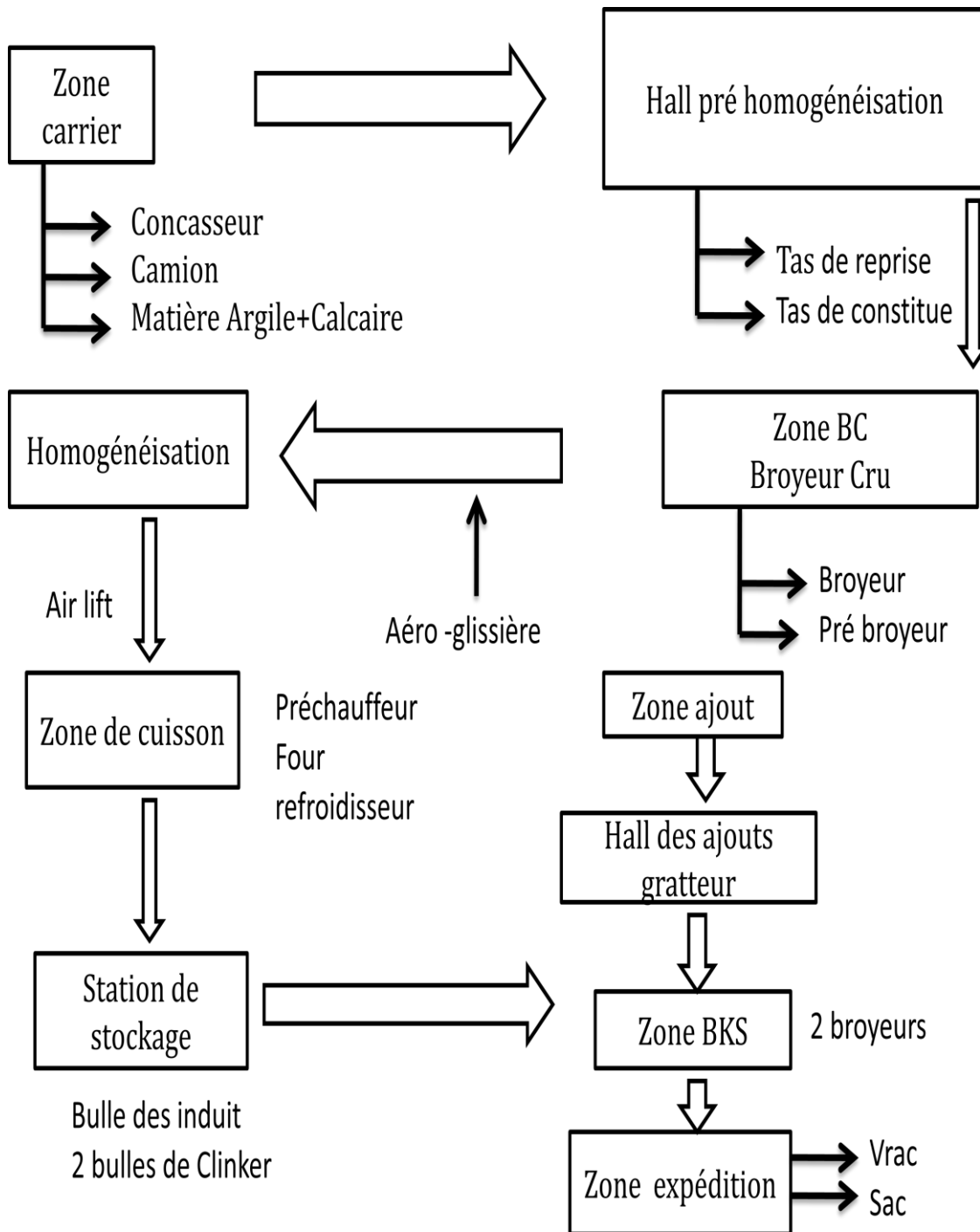


Fig.III.4. Dispositif général de l'usine

### III.3.3.1. Extraction de la matière première

L'extraction consiste à extraire du calcaire et de l'argile à partir de la carrière. Ces matières premières sont extraites des parois rocheuses par de l'explosif ou à la pelle mécanique. La roche est acheminée par des dumpers et des bandes transporteuses vers un atelier de

concassage. Les matières premières doivent être échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition régulière dans le temps [12].



**Fig. III.5.** *Extraction les engins dans la carrière de Béni-Saf*

### III.3.3.2. Préparation du cru (concassage et pré-homogénéisation)

Le cru est réalisé à partir d'un mélange calcaire – argile sous titré et corrigé par du calcaire et du fer. Ces deux constituants sont concassés (voir **Fig. III.6**) en carrière (à Béni-Saf) au débit de 1200 t/h pour une granulométrie finale de 0 à 25 mm. Cette opération de concassage assure également un certain mélange des matières premières arrivant de la carrière et contenant de fortes proportions d'argile, de fer et de traces d'autres éléments.



**Fig. III.6** *Concassage des matières premières.*

Le mélange, acheminé à l'usine par transporteur couvert, est stocké dans un hall de pré-homogénéisation (Voir **Fig. III.7**) qui comporte deux tas, l'un en constitution, l'autre en reprise. Alors, le mélange concassé est déversé en couche parallèle par un Stacker (voir **Fig. III.8**) pour constituer un tas de 30 000 à 35 000 tonnes [12].

Une correction est prévue au niveau du broyeur cru par ajout de fer et de calcaire. Ces ajouts sont stockés dans deux trémies. Une trémie tom ponde 90 t reçoit le mélange ; cette dernière est alimentée de façon discontinue à partir du tas de pré-homogénéisation par une roue pelle dont le débit peut atteindre 450 t/h. Une station d'échantillonnage située en amont permet de rectifier à la demande l'envoi de calcaire (disposition différente d'un couloir à l'autre dans la carrière) et de connaître la composition chimique moyenne.



**Fig. III.7.** *hall de pré-homogénéisation*



**Fig. III.8.** *Stacker*

### **III.3.3.3. Broyage du cru**

Les matières premières pré-homogénéisées doivent être finement broyées pour être chimiquement plus réactive au cours de leur cuisson dans le four. Elles passent donc dans des doseurs alimentant un broyeur sécheur (il ne doit pas pratiquement subsister des particules de dimensions supérieures à 0.2 mm). La fonction du séchage est nécessaire car le

broyage ne peut s'effectuer que dans la mesure où la matière ne s'agglomère pas sous l'effet conjugué de l'humidité et du compactage des produits par les outils de broyage [12].



**Fig. III.9.** *Broyage du cru (Cimenterie de Béni Saf)*

Le broyage et le séchage du cru sont réalisés à la cimenterie de Béni-Saf à un débit de 270 t/h dans un broyeur à sortie centrale de 5 m de diamètre et de 13,9 m de longueur, avec un compartiment de séchage et deux compartiments de broyage. L'entraînement est assuré par 2 moteurs de 1650 Kw.

La sélection granulométrique est réalisée au moyen d'un séparateur statique de 7,5 m et d'un séparateur dynamique de 7,2 m alimenté par deux élévateurs pouvant assurer chacun 60 % du débit.

Le séchage est assuré par les gaz de four à 320 – 330 °C en période normale pour une humidité de 5,5 %, pour une humidité du > 5,5 % un appoint du foyer auxiliaire devient nécessaire.

Les gaz de four excédentaires sont refroidis et humidifiés dans une tour de conditionnement en vue de leur épuration par filtre électrostatique. Le dépoussiérage des gaz est assuré par deux électrofiltres à deux champs.

#### **III.3.3.4. Homogénéisation**

Dans la cimenterie de Béni-Saf, la farine crue est homogénéisée en continu dans deux silos (voir **Fig.III.10**), à cône central de mélange, d'une capacité unitaire de 10000 t. Pour accroître l'efficacité de l'homogénéisation, les deux silos sont alimentés et soutirés simultanément. Les deux silos d'homogénéisation prévus sont d'une capacité de 20 000 Tonnes chacun qui doivent assurer une autonomie d'environ 03 jours. Les silos sont alimentés par élévateurs à godet [15].



Fig. III.10. Silos d'homogénéisation (Cimenterie de Béni Saf)

### III.3.3.5. Cuisson

On entend par cuisson le processus de transformation de la matière crue en clinker par un apport thermique suffisant pour obtenir des réactions chimiques complètes conduisant à l'élimination presque totale de la chaux non combinée. Pour améliorer le bilan thermique, des échangeurs à cyclone sont utilisés en amont du four (voir la Fig. III.11) pour préchauffer la farine à une température aux environs de 900 °C [12].

La ligne de cuisson est constituée par :

- Un préchauffeur
- Un four rotatif
- Un refroidisseur

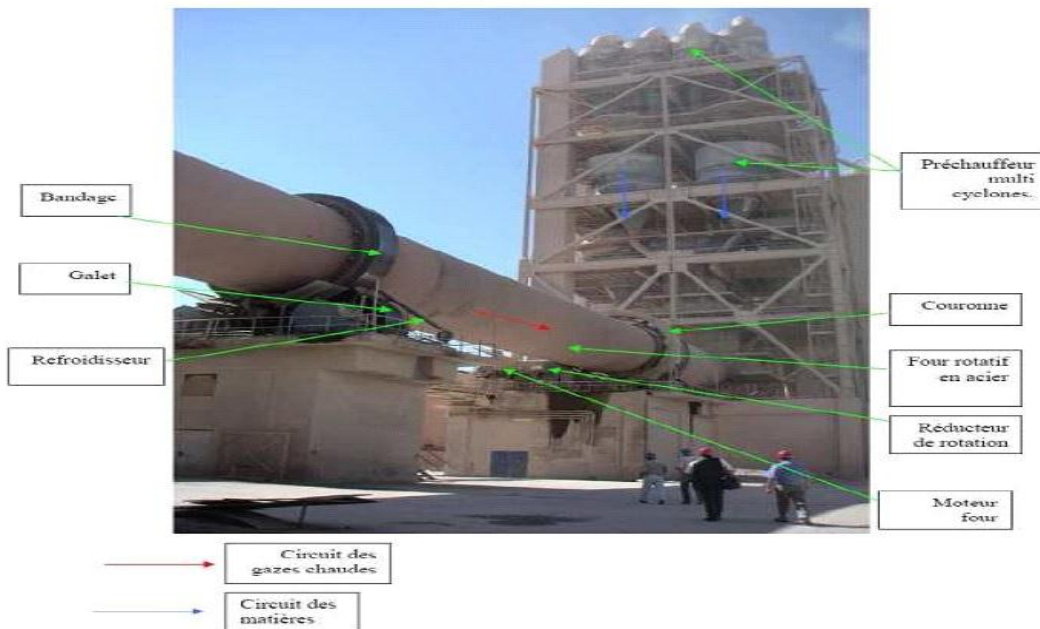


Fig.III.11. Four rotatif à la cimenterie de Béni Saf [5]



▪ **Préchauffeur ou cyclones**

À la cimenterie de Béni Saf, l'atelier de cuisson comporte, en parallèle, deux préchauffeurs à 4 étages qui alimentent le four rotatif (voir **Fig.III.12**)

Les gaz réchauffent la poudre crue qui circule dans les cyclones en sens inverse, par gravité. La poudre s'échauffe ainsi jusqu'à 800 °C environ et perd donc son gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et son eau.

C'est un échangeur à contre courant destiné à préchauffer la farine avant son entrée dans le four, en récupérant la chaleur des gaz sortant du four environ à 100 °C, par le fait que l'argile et le calcaire ont la même densité (2.70 g/cm<sup>3</sup>) [17], un exhausteur monté sur les cyclones aspire les gaz de combustions et la farine, faisant une tornade qui garantit que tous les grains du cru subissent la chaleur de gaz.



**Fig.III.12** *Préchauffeur (Cimenterie de Béni Saf)*

▪ **Four rotatif**

Le four constitué par une virole cylindrique de 90 m de long et de 5.6 m de diamètre protégée par de la brique réfractaire, incliné selon un angle de 1 à 4 degrés par rapport à l'horizontale (voir **Fig.III.13**). Le mélange cru est chargé à l'extrémité supérieure, le combustible et l'air comburant étant brûlé à l'extrémité inférieure. (Voir **Fig.III.14**)

L'entraînement du four à la cimenterie de Béni-Saf est assuré par un moteur à vitesse variable de 500 Kw. Le tirage des gaz de four est réalisé par deux ventilateurs de 1200 Kw.



Fig.III.13 Four rotatif (Cimenterie de Béni Saf)

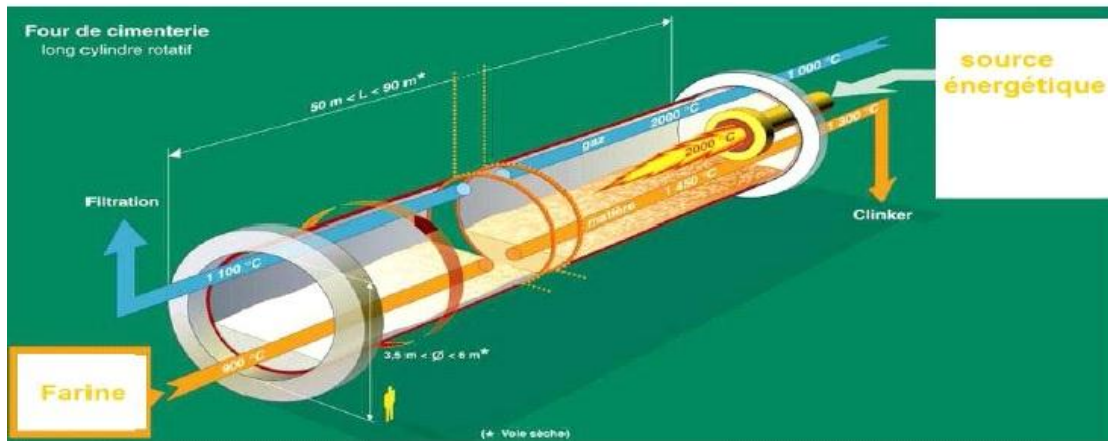


Fig.III.14. Schéma d'un four rotatif [16]

▪ **Refroidisseur**

Le refroidisseur (voir Fig.III.15) a pour rôle d'abaisser la température du clinker tombant du four à une température d'environ 1135 °C jusqu'à 80-100 °C.

Alors, un refroidisseur à grilles (équipé d'une batterie de ventilateurs fournissant l'air de refroidissement [17]) traite le clinker sortant du four rotatif. L'excès d'air de refroidissement est rejeté à l'atmosphère après épuration, dans une batterie de filtres à graviers.



**Fig.III.15** Refroidisseur (*Cimenterie de Béni Saf*)

### III.3.3.6. Stockage du clinker

La manutention du clinker est réalisée par des transporteurs métalliques vers les deux stocks polaires principaux de capacité unitaire de 30000 t (voir la **Fig.III.16**). Un troisième stock de 3000 t est réservé pour les incuits. L'extraction de clinker est assurée par des extracteurs vibrants.



**Fig.III.16.** *Les bulles de stockage du clinker (Cimenterie de Béni Saf)*

Les ajouts cru et ciments sont, par raison de simplicité, stockés en long dans un hall unique et repris par un gratteur.



### III.3.3.7. Broyage du ciment

Il est réalisé en continu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts.

Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granulats de clinker en poudre, d'autre part, de procéder à l'ajout du gypse (dont le rôle est de réguler le phénomène de prise), ainsi qu'à celui des éventuels autres constituants (pouzzolane, calcaire de correction) ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés (voir **Fig.III.17**) [5].



**Fig.III.17.** *Broyeur à ciment à la cimenterie de Béni Saf*

Dans la cimenterie de Béni Saf, le broyage du ciment est assuré par deux broyeurs à boulets (débits: 90 t/h) en circuit fermé, d'un Ø 4 x 15 m et de 3400 KW, équipés de séparateurs dynamiques. Ces derniers sont alimentés par des élévateurs à godets de 400 t/h.

L'air de ventilation du broyeur est épuré par un filtre à manche. L'évacuation du ciment vers les silos de stockage est assurée par une pompe pneumatique.

### III.3.3.8. Stockage, ensachage et expédition

À la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage (voir **Fig.III.18**), pour être soit ensaché soit expédié en vrac.

L'ensachage, qui dans les pays industrialisés ne représente qu'environ 30 % de la production de ciment [18], s'effectue dans des sacs en papier à l'aide de machines capables de remplir de 2000 à 4000 sacs par heure, la livraison en vrac est assurée par camions.



Fig.III.18. Silos de stockage de ciment (Cimenterie de Béni Saf)

Les expéditions du matériau ciment produit à la SCIBS sont effectuées en sac et vrac par route et par chemin de fer.

La Société des Ciments de Béni Saf (SCIBS) possède :

- Deux lignes pour le vrac camion d'une capacité unitaire de 250 à 300 t/h.
- Deux postes pour le vrac wagon d'une capacité unitaire de 300 t/h.
- Six ensacheuses rotatives à 08 becs d'une capacité unitaire de 2000 sacs/h (100 t/h).
- Un poste de palettisation qui peut traiter 2000 sacs/h.

Les schémas ci-dessous récapitulent l'ensemble du process de fabrication du ciment à la cimenterie de Béni Saf.

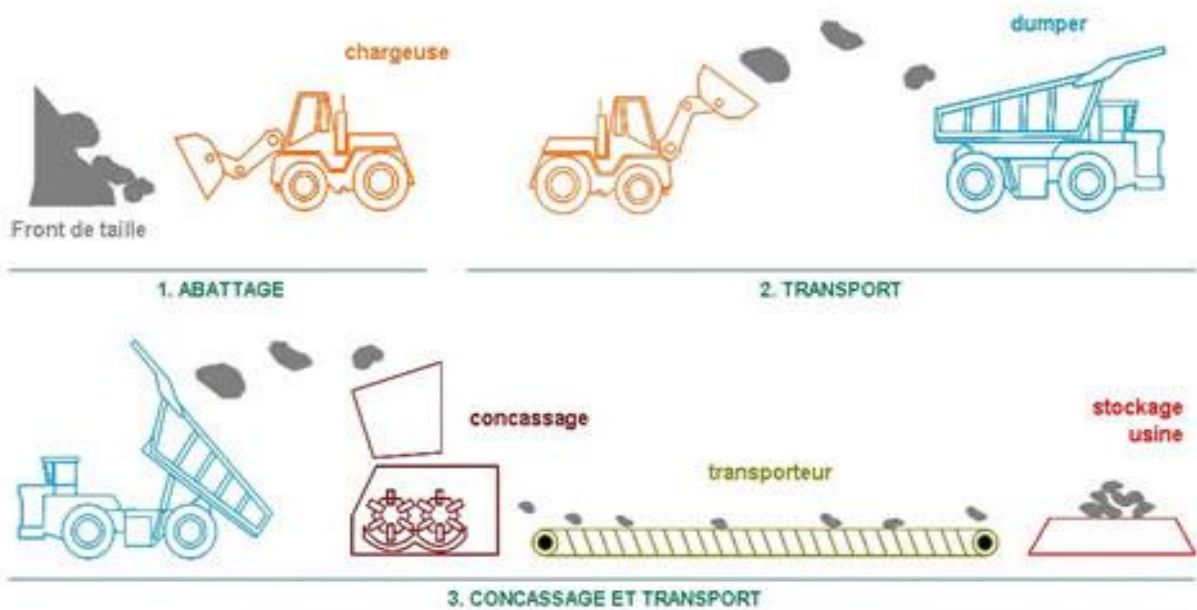


Fig.III.19. Schéma indiquant l'Abattage, Concassage et transport des matières premières (SCIBS).

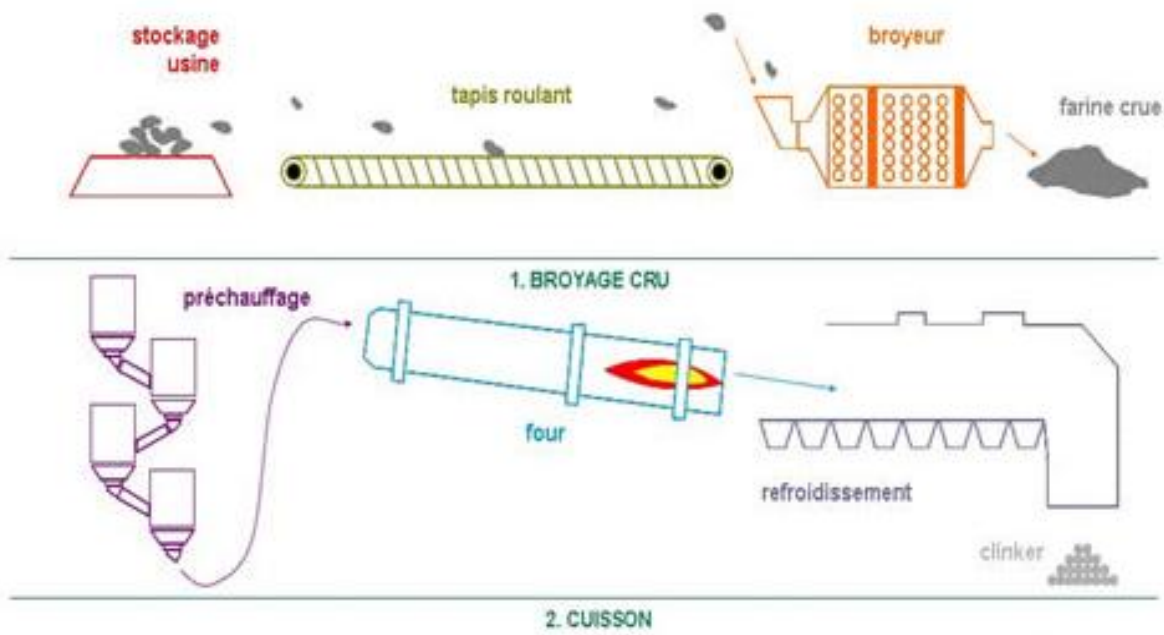


Fig.III.20. Schéma indiquant le broyage du cru et la cuisson de la farine crue (SCIBS)

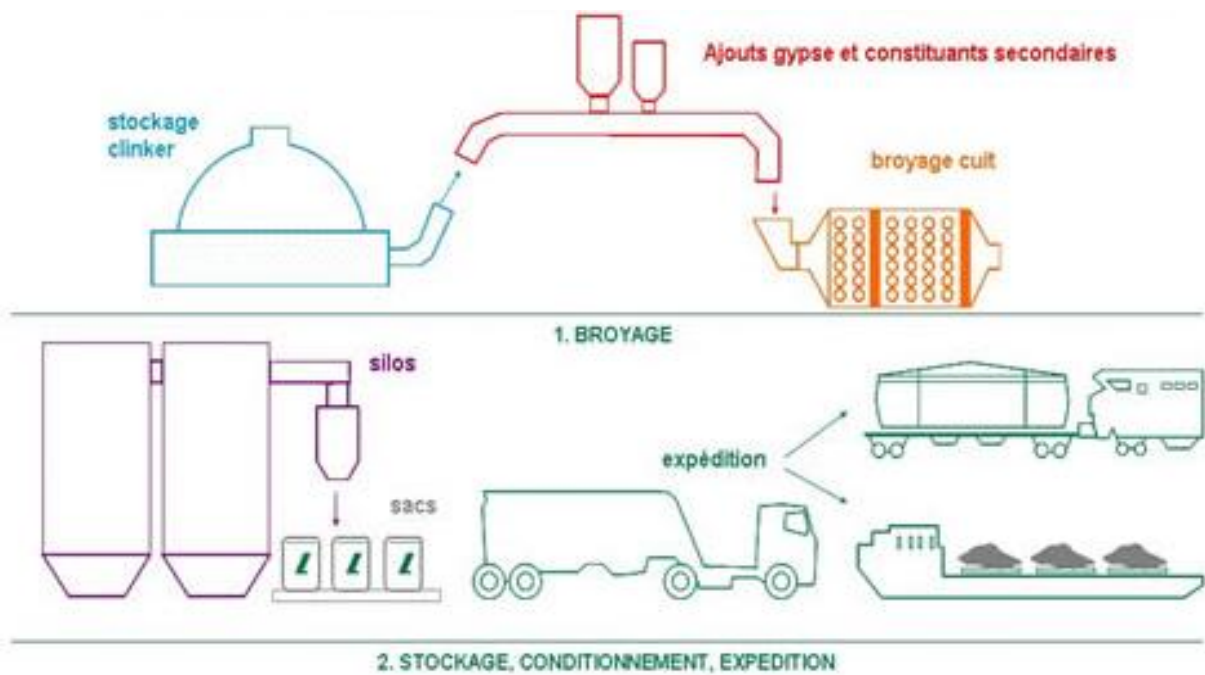


Fig.III.21. Schéma indiquant le broyage, le stockage et l'expédition du ciment (SCIBS)

### III.4. Problèmes écologique et économique dans la cimenterie de Béni Saf

#### III.4.1. Problème écologique

Des signes de déséquilibre écologique ont été remarqués autour de la cimenterie de Béni Saf.

Au niveau atmosphérique : couche poussiéreuse.

- Au niveau de la végétation et de l'agriculture : maladie des feuilles de différents arbres et diminution de la production potagère et agricole.
- Au niveau sanitaires : multiplication de cas de maladies (asthme et maladies respiratoires).



**Fig.III.22.** *Emission atmosphérique de la cimenterie (SCIBS)*

#### III.4.1.1. Types de polluants rejetés dans l'atmosphère

Dans l'industrie du ciment de Béni Saf, les principaux rejets vers l'atmosphère sont constitués essentiellement par les gaz de combustion au niveau des fours de cuisson, par le phénomène de décarbonatation et par les émissions de poussières à tous les niveaux de production du ciment.

Les polluants contenus dans le gaz de combustion dépendent de la nature du combustible utilisé (principalement le gaz naturel) et de la composition du minerai. Parmi les principaux polluants rencontrés le dioxyde de soufre ( $SO_2$ ), l'oxyde d'azote ( $NO_2$ ), le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ).

- **Les Poussières**

Les poussières représentent la forme de pollution la plus importante au niveau des cimenteries. Un technicien à la SCIBS, signalant que la cheminée de l'usine rejette, actuellement, 40 mg/NM<sup>3</sup> (milligrammes/normal mètre cube). Elle est plus ressentie par la population pour des raisons physiologiques et psychologiques.

Leur granulométrie est un facteur important, les poussières fines restent en suspension dans l'atmosphère alors que les plus grosse se déposent sur le sol à différentes distances de la source selon leur taille. [14]

Plusieurs investissements ont été mis en place pour régler l'enjeu de dépoussiérage, La direction de la cimenterie procède régulièrement, depuis 2009, au changement des filtres qui répondent au mieux aux normes exigées suivant l'évolution de la technologie, soit du filtre à ressort à l'électro-filtre installé en 2011. Ces dispositifs n'ont freiné que provisoirement les rejets atmosphériques. [32]

En outre, une installation des filtres à manche (voir **Fig.III.23**) a été effectuée au niveau de l'unité de broyage du ciment, un au niveau de l'échantillonnage et un autre pour le broyeur de cru [67].



**Fig.III.23.** *Filtre à manches (Cimenterie de Béni Saf)*

Mais malgré ces grands investissements le problème de poussière est toujours existant, C'est le constat fait par le wali, évoquant les promesses faites en séance plénière de l'APW à deux reprises par les représentants de SCBIS, après leur interpellation à propos des émanations de poussière de la cimenterie de Béni Saf : «On nous a assuré que 42 milliards de centimes avaient été dégagés pour l'achat de filtres à manche, mais rien.» [47]

#### **III.4.1.2. Les menaces écologiques de la cimenterie de Béni Saf**

Depuis plusieurs années, la population de Beni-Saf est exposée à un air pollué par des particules de poussière toxique et des gaz émis qui représentent un poison invisible aérien rejeté, jour et nuit, par la cheminée de la cimenterie installée à l'entrée Est de la ville. La population est inquiète, Le territoire, la flore et la santé de la population sont gravement menacés par les

Le risque d'atteinte à la santé publique est multipliée pour une population de près de 40 000 habitants, hormis l'agression environnementale et écologique.

La poussière que respire la population est source de pathologies respiratoires et pulmonaires, mettant ainsi en danger la santé, de la population de Béni-Saf. Plusieurs cas d'allergie et d'asthme, de mal de gorge, de migraine, et autres conséquences

ont vu le jour depuis longtemps déjà, à cause de ce poison invisible, aérien que respire Beni-Saf.

Tous les gens sensés ont le devoir de soutenir et signer cette pétition, qui n'a qu'un objectif, celui d'arrêter le massacre écologique porté tant à la flore, qu'à la faune et au climat, et à éradiquer cette atteinte à la santé publique, qui au final, revient excessivement chère à la société en général.

#### **III.4.2. Problème économique**

La cimenterie de Béni Saf est comme toute industrie cimentière en terme d'énergie, elle est fortement consommatrice d'énergie calorifique et électrique. Malgré la modernisation constante de son procédé, l'industrie cimentière demeure une industrie énérgo-intensive.

Les besoins calorifiques sont essentiellement liés à la cuisson des matières premières dans le four, les matériaux devant être portés à une température de l'ordre de 1450°C. La consommation calorifique varie entre 3000 et 8000 kJ/tonne de ciment.

La consommation électrique varie entre 70,7 et 159,5 kWh/tonne de ciment, ces chiffres sont à cause des différentes installations installés au sein de la cimenterie de Béni Saf, telles que les ventilateurs, les broyeurs les bandes transporteuses ..., qui sont des gros consommateurs d'énergie électrique. La facture d'électricité de la cimenterie est estimée en moyenne de 40 000 000,00 DA (40 millions Dinar Algérien) mensuellement. D'après l'ingénieur électricien de la cimenterie de Béni Saf Mr.B.Djamel.

#### **III.5. Conclusion**

Etant donnée l'importance économique de la cimenterie de SCIBS et son emploi d'une grande masse de main d'œuvre, avec un potentiel productif théorique de plus de 1 200 000 de tonnes de ciments, Ceci a pour conséquence le rejet de plusieurs catégories de polluants avec des effets nocifs et un impact négatif sur l'environnement, ainsi qu'une grande consommation d'énergie calorifique et électrique.

Toute économie dans la consommation d'électricité permet de réduire la facture énergétique, mais aussi les émissions de gaz à effet de serre liées à la production d'électricité

La réduction des émissions de ses polluants est une nécessité pour la collectivité et aussi une source d'avantage pour l'industriel. Le dérèglement climatique est reconnu par tous. L'urgence de mettre en place des solutions innovantes pour réduire ces émissions est une priorité absolue.



# Chapitre IV.

## ***Solutions appropriées pour une consommation moindre de l'énergie et une réduction des émissions de CO2***

### Sommaire du chapitre

#### **IV.1. Introduction**

#### **IV.2. Utilisation des batteries de condensateurs**

##### **IV.2.1. Définition**

##### **IV.2.2. But de l'utilisation des batteries de condensateurs**

##### **IV.2.3. Energies active, réactive, apparente (définitions et rappel)**

##### **IV.2.4. Compensation de l'énergie réactive**

##### **IV.2.5. Réduction de la puissance apparente absorbée (la compensation)**

##### **IV.2.6. Types de compensation**

##### **IV.2.7. Exemple de calcul de puissance de batterie à installer**

##### **IV.2.8. Conclusion**

#### **IV.3. Valorisation énergétique des déchets en cimenterie**

##### **IV.3.1. Introduction**

##### **IV.3.2. Les combustibles de substitution (Combustibles issus de déchets)**

##### **IV.3.3. Consommation d'énergie et de combustibles**

##### **IV.3.4. Comment utiliser les déchets pour produire du ciment ?**

##### **IV.3.5. Comment incinérer les déchets industriels ?**

##### **IV.3.6. Protocole de contrôle, sécurité et qualité**

##### **IV.3.7. Les avantages de la valorisation énergétique des déchets**

##### **IV.3.8. Conclusion**

#### **IV.4. Blade Compressor (Compresseur à lame)**

##### **IV.4.1. Introduction**

##### **IV.4.2. Définition d'un compresseur**

**IV.4.3. Compresseur à piston**

**IV.4.4. Transport pneumatique dans la cimenterie de Béni Saf**

**IV.4.5. La nouvelle technologie pour remplacer le compresseur à piston**

*IV.4.5.1. Définition d'un compresseur à lame*

*IV.4.5.2. Une nouvelle prise sur un vieux problème*

*IV.4.5.3. Principe de fonctionnement*

*IV.4.5.4. Comment le compresseur à lame pourrait révolutionner l'industrie du ciment ?*

**IV.4.6. Conclusion**

**IV.5. Réduction des émissions de poussières canalisées à l'aide des installations de dépoussiérage**

**IV.5.1. Utilisation des filtres électrostatiques**

**IV.5.2. Utilisation des filtres à manches**

*IV.5.2.1. Les performances des filtres à manche*

**IV.6. Conclusion**



## *Chapitre IV.*

# ***Solutions appropriées pour une consommation moindre de l'énergie et une réduction des émissions de CO<sub>2</sub>***

### **IV.1. Introduction**

La consommation énergétique excessive et la pollution de l'environnement (principalement par des émissions importantes de CO<sub>2</sub>) sont les deux principales caractéristiques du secteur. Face à ces contraintes, les pays développés évitent d'installer de nouvelles usines sur leurs territoires et cherchent à acquérir des unités implantées dans d'autres pays.

L'industrie cimentière est fortement consommatrice en énergie calorifique et électrique. Cette énergie consommée représente 30 à 40 % du prix de revient du ciment.

C'est pourquoi il est important et nécessaire pour l'industrie cimentaire à Béni Saf d'étudier et d'adopter continuellement des technologies plus éco-énergétiques pour améliorer sa rentabilité et sa compétitivité. Il faut donc analyser de façon méthodique les performances des différents ateliers de production ainsi que les conditions d'exploitation, afin d'en déduire les éventuelles sources de progrès énergétiques possibles en donnant l'intérêt majeur à la protection de l'environnement.

Alors, dans ce chapitre nous avons présenté les meilleures solutions possibles qui peuvent être adoptées par la cimenterie de Béni Saf, pour atteindre des objectifs économiques et écologiques souhaités, tels que la réduction de la consommation énergétique et les émissions des gaz à effet de serre (principalement le gaz carbonique CO<sub>2</sub>).

## IV.2. Utilisation des batteries de condensateurs

### IV.2.1. Définition

Une batterie de condensateur est un ensemble de condensateurs réunis généralement en parallèles entre eux pour former un condensateur plus "important" (voir **Fig. IV.1**)

### IV.2.2. But de l'utilisation des batteries de condensateurs

L'énergie électrique est essentiellement distribuée aux utilisateurs sous forme de courant alternatif par des réseaux en haute, moyenne et basse tension.

L'énergie consommée est composée d'une partie "active", transformée en chaleur ou mouvement, et d'une partie "réactive" transformée par les actionneurs électriques pour créer leurs propres champs électromagnétiques [48].

Les consommateurs d'énergie réactive sont les moteurs asynchrones (Four, Broyeur ...), les transformateurs, les inductances et les convertisseurs statiques.

L'utilisateur ne bénéficie que de l'apport énergétique de la partie "active" ; la partie "réactive" ne peut pas être éliminée, mais doit être "compensée" par des dispositifs appropriés. L'énergie totale soutirée au réseau de distribution sera ainsi globalement réduite [48].

L'énergie réactive fait consommer plus de puissance, et par conséquent, alourdir la facture d'électricité [49]. Ce qui augmente le coût de l'électricité totale de la cimenterie de Béni Saf.

Alors, l'amélioration consiste à installer des batteries de condensateurs (voir **Fig. IV.1**) (source d'énergie réactive) au sein de la cimenterie de Béni Saf.

Ces batteries de condensateurs de puissance diminuent la quantité d'énergie réactive [50], et donc une économie sur la facture d'électricité de la cimenterie sera clairement remarquée.



**Fig. IV.1.** Batteries de condensateurs [51]

### IV.2.3. Energies active, réactive, apparente (définitions et rappel)

Toute machine électrique utilisant le courant alternatif (moteur, transformateur) met en jeu deux formes d'énergie : l'énergie active et l'énergie réactive.

L'énergie active consommée (*kW*) résulte de la puissance active *P* des récepteurs. Elle se transforme intégralement en puissance mécanique (travail) et en chaleur (pertes). L'énergie réactive consommée (*kVAR*) sert essentiellement à l'alimentation des circuits magnétiques des machines électriques. Elle correspond à la puissance réactive *Q* des récepteurs.

L'énergie apparente (*kVA*) est la somme vectorielle des deux énergies précédentes. Elle correspond à la puissance apparente *S* des récepteurs (voir Fig. IV.3), somme vectorielle de *P* et *Q* [51].

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

*S* : Puissance apparente (*kVA*)

*P* : Puissance active (*kW*)

*Q* : Puissance réactive (*kVAR*)

$\varphi$  : Déphasage entre *S* et *P*

- Les représentations graphiques

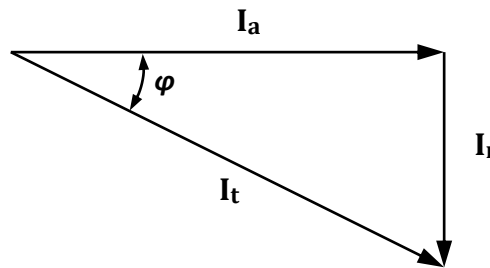


Fig. IV.2. Composition vectorielle des Courant [40]

*I<sub>t</sub>* = Le courant apparent,

*I<sub>a</sub>* = Le courant actif,

*I<sub>r</sub>* = Le courant réactif,

$I_a = I \cdot \cos \varphi$

$I_r = I \cdot \sin \varphi$

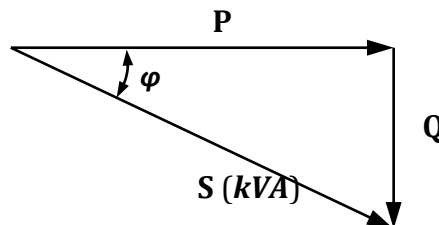


Fig. IV.3. Composition vectorielle des puissances [51]

Avec :  $S = UI$  (kVA),  
 $P = UI \cdot \cos \varphi$  (kW),  
 $Q = UI \cdot \sin \varphi$  (kVAR),  
 $\text{tg } \varphi = Q/P$ ,  
 $\cos \varphi = P/S$ .

Le facteur de puissance c'est le quotient de la puissance active P consommée et de la puissance apparente S fournie.

Un  $\cos \varphi$  proche de 1 indique une faible consommation d'énergie réactive et optimise le fonctionnement d'une installation [51].

$$F = \frac{P(W)}{S(VA)} \approx \cos \varphi$$

Et donc le but est d'atteindre un facteur de puissance idéal. Un bon rendement correspond à un  $\cos \varphi$  proche de 1 ( $\cos \varphi \approx 1$  (= 0,95)).

En régime de tarification Haute Tension (comme le cas de la SCIBS), une consommation réactive trop élevée entraîne l'application d'une pénalité financière par le distributeur. Le seuil est fixé par la valeur du  $\cos \varphi$  qui doit rester > 0,9 [51].

Pour améliorer ce facteur de puissance, il faut donc qu'on installe des batteries de condensateurs au niveau de la cimenterie de Béni Saf. Ces batteries ont pour rôle d'effectuer une opération appelée "compensation".

#### IV.2.4. Compensation de l'énergie réactive

Il est nécessaire de produire l'énergie réactive au plus près possible des charges pour éviter qu'elle ne soit appelée sur le réseau. C'est ce qu'on appelle "compensation de l'énergie réactive" (voir Fig. IV.4). Alors, l'objectif de la compensation d'énergie réactive est de réduire le courant appelé sur le réseau. L'énergie réactive sera donc fournie par des condensateurs [48].

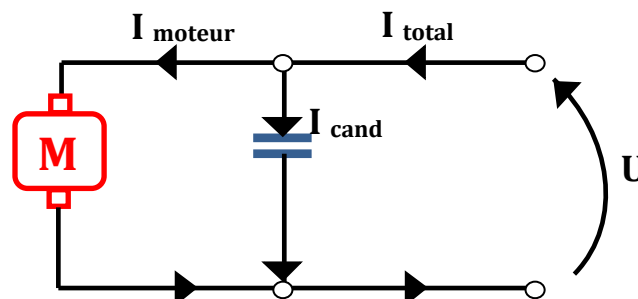


Fig. IV.4. Circuit de l'installation en adjoignant une batterie de condensateurs [51]

La circulation de l'énergie réactive Q appelée sur le réseau a des incidences techniques et économiques importantes, en effet, elle va dégrader le  $\cos \varphi$  et pour une même puissance active P nécessaire, il faut fournir d'autant plus de puissance apparente S (voir Fig. IV.5) [48, 52].

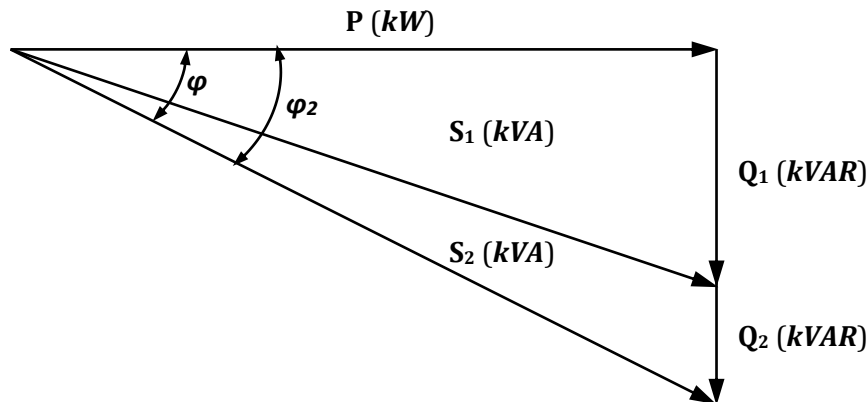


Fig. IV.5. Composition vectorielle des puissances avec l'augmentation de S [48]

#### IV.2.5. Réduction de la puissance apparente absorbée (la compensation)

Sur une installation de puissance réactive Q<sub>1</sub> et de puissance apparente S<sub>2</sub>

On installe une batterie de condensateurs de puissance Q<sub>c</sub>.

- La puissance réactive passe de Q<sub>2</sub> à Q<sub>1</sub>, telle que:  $Q_1 = Q_2 - Q_c$ .
- La puissance apparente passe de S<sub>2</sub> à S<sub>1</sub>.

La puissance apparente après compensation S<sub>1</sub> est donc diminuée (voir Fig. IV.6).

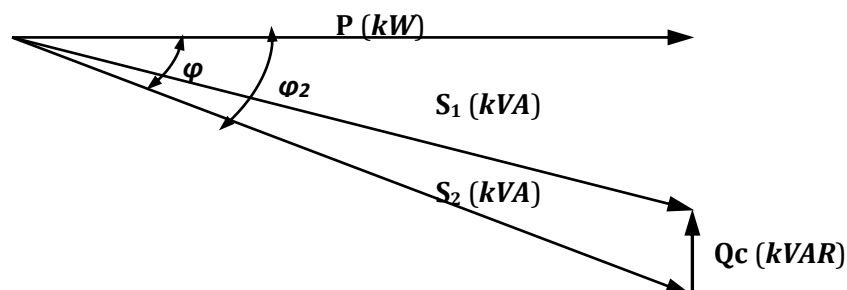


Fig. IV.6. Composition vectorielle des puissances expliquant le principe de la compensation d'énergie réactive [48]

En fait, les composantes réactives des courants se sont compensées (voir Fig. IV.7).

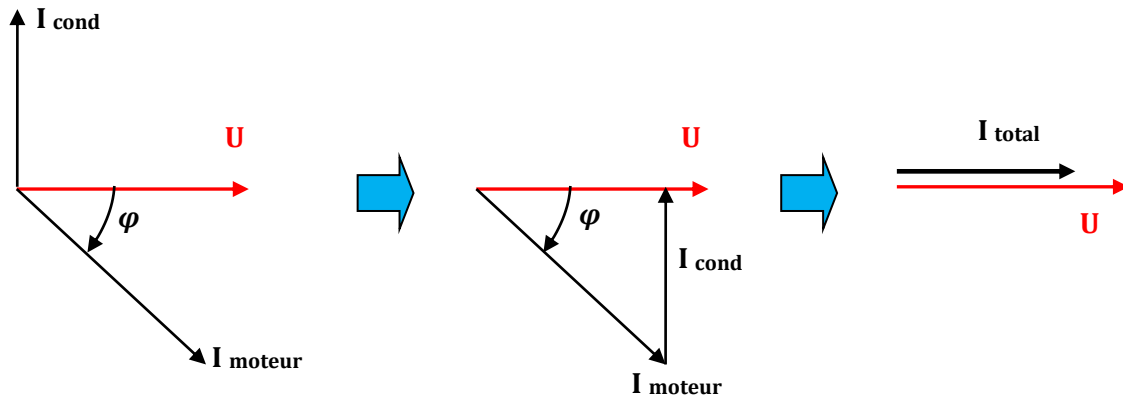


Fig. IV.7. Composition vectorielle des courant après la compensation [51]

L'intérêt économique de la compensation est mesuré en comparant le coût d'installation des batteries de condensateurs aux économies qu'elle procure.

#### IV.2.6. Types de compensation

Il existe différents types de compensation :

- Compensation globale: la batterie est raccordée en tête d'installation et assure la compensation pour l'ensemble des charges.
- Compensation partielle: la batterie est installée par secteur, au niveau du tableau de distribution.
- Compensation Locale: la batterie est raccordée directement aux bornes de chaque récepteur inductif (moteur en particulier) [53].

Pour la cimenterie de Béni Saf, nous proposons d'appliquer une compensation individuelle (Locale), où sur chaque consommateur important, on prévoit un condensateur raccordé en parallèle (voir Fig. IV.8). Il sera mis sous tension uniquement si l'appareil fonctionne.

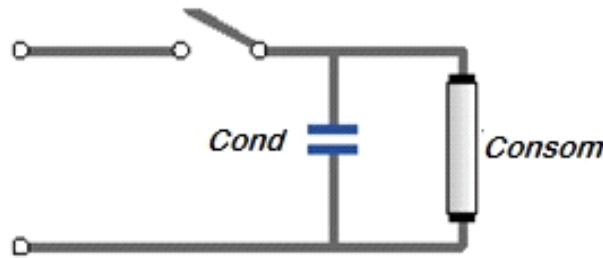


Fig. IV.8. Schéma représentant la compensation locale [51]

La compensation locale est techniquement idéale, elle permet de produire l'énergie réactive à l'endroit même où elle est consommée et en quantité ajustée à la demande [48]. En outre, elle permet de réduire le courant demandé par les équipements avec un mauvais facteur de puissance et donc de "soulager" le câble qui raccorde ces équipements. La technique de la compensation locale permet aussi d'éviter la surcompensation puisque la batterie est mise hors tension en même temps que l'appareil (système auto-réglable) [51].

Le choix de la batterie doit être fait en tenant compte des caractéristiques du matériel à compenser (la puissance active  $P$ , la puissance réactive  $Q$ , ...etc.).

Des précautions seront également prises pour l'appareil de protection des batteries de condensateur car des courants transitoires importants apparaissent à l'enclenchement et au déclenchement des batteries. Pour limiter ce phénomène, des résistances de décharge sont installées en parallèle sur la batterie de condensateurs (voir Fig. IV.9) [51].

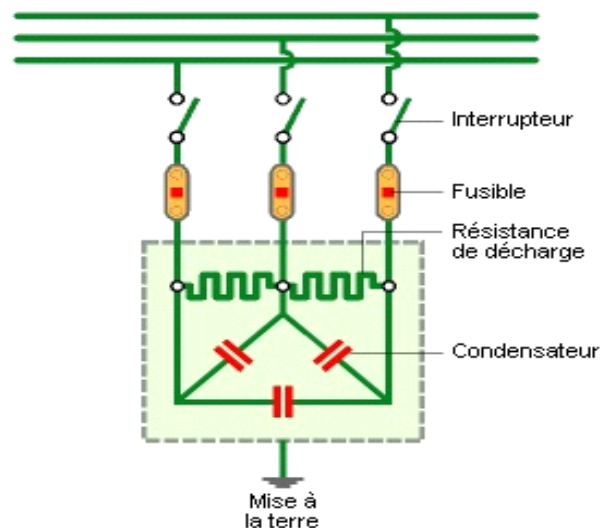


Fig. IV.9. Schéma représentant l'emplacement des résistances de décharges [51]

#### IV.2.7. Exemple de calcul de puissance de batterie à installer

Le choix de batterie qu'il faut installer dépend des caractéristiques du matériel à compenser, c'est-à-dire pour calculer la puissance de la batterie de condensateur Q<sub>c</sub> il faut retirer les informations de l'installation telle que la puissance active P, la puissance réactive Q, tg φ et le cos φ.

L'exemple ci-dessous explique comment calculer la puissance Q<sub>c</sub> nécessaire.

Tout d'abord, il faut relever de l'installation à compenser les valeurs nécessaires au calcul dont la puissance P, la puissance Q et les tg φ et les cos φ pendant une période du temps.

Puissance réactive nécessaire des condensateurs :  $Q_c = P \times p$

D'où, p est le coefficient permettant de passer du cos φ<sub>1</sub> initial à cos φ<sub>2</sub> souhaité. Ce coefficient p est obtenu par :  $p = \text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2$

Le tableau ci-dessous (**Tab. IV.1**) représente les valeurs de cos φ correspondantes aux valeurs de tg φ.

cos φ	0,2	0,3	0,4	0,5	0,56	0,6	0,64	0,7	0,74	0,8	0,84	0,9
tg φ	4,90	3,18	2,29	1,73	1,48	1,33	1,2	1,02	0,91	0,75	0,65	0,48

**Tab. IV.1.** Les valeurs de cos φ correspondantes aux valeurs de tg φ

#### ▪ Application numérique

Les informations ci-dessous sont relevées du matériel à compenser [51]

Relevé correspondant au compteur actif pendant 10 heures = 1670 [kWh]

Relevé correspondant au compteur réactif pendant 10 heures = 2000 [kVARh]

Donc on divise par 10 pour avoir les puissances active et réactive.

$$P = 167 \text{ [kW]} \quad ; \quad Q = 200 \text{ [kVAR]}$$

On rappelle que:  $\text{tg } \varphi = Q/P$ . Donc, il en résulte:  $\text{tg } \varphi_1 = 200/167 = 1,2$

D'où,  $\cos \varphi_1 = 0,64$  (voir **Tab. IV.1**).

On souhaite une amélioration du facteur de puissance pour atteindre  $\cos \varphi_2$  souhaité = 0,9 ;  
Donc,  $\text{tg } \varphi_2 = 0,48$  (voir **Tab. IV.1**).

Le facteur p correspondant est alors de :



$$p = \operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2 = 1,2 - 0,48 = 0,72.$$

Il en résulte la puissance des condensateurs à installer :

$$Q_C = P \times p = 167 \times 0,72 = 120 \text{ [kVAR]}.$$

Il est aussi possible de calculer le temps de retour de l'installation (retour d'investissement de la batterie de condensateurs), pour cela il faut extraire le montant de la pénalité d'énergie réactive depuis la facture d'électricité

Ainsi le prix indicatif de la batterie de condensateurs plus l'installation [51].

Alors, la période de retour d'investissement =  $F_c/F_r$  (en mois)

### IV.2.8. Conclusion

Les conséquences de cette énergie réactive sont nombreuses, dont des pénalités par le fournisseur d'électricité et l'augmentation de la puissance souscrite au fournisseur d'énergie, surcharge au niveau du transformateur et des câbles d'alimentation,...etc.

Globalement l'impact économique est donc très important. La solution à tous ces problèmes, consiste à installer des batteries de condensateurs qui vont neutraliser cette énergie réactive en s'y opposant. Ces batteries de condensateurs, compensent l'énergie réactive consommée par les équipements électriques, ce qui permet de réduire une partie de la facture d'énergie électrique consommé dans la cimenterie. [48].

## IV.3. Valorisation énergétique des déchets en cimenterie

### IV.3.1. Introduction

L'industrie cimentière participe à l'effort collectif pour la préservation des combustibles fossiles en valorisant dans ses usines des quantités importantes de déchets à potentiel calorifique intéressant. On parle notamment de Combustibles Solides de Récupération (CSR). Ces CSR sont constitués de déchets textiles, d'emballages ménagers, de farines animales, de pneumatiques non recyclables, de résidus de broyage automobile ou de boues de station d'épuration séchées.

L'utilisation des combustibles de substitution comme certains déchets est donc une des solutions pour réduire la consommation énergétique et les émissions de CO<sub>2</sub> par l'industrie cimentière. S'ils n'étaient pas brûlés en cimenterie, ces déchets seraient éliminés par la voie de l'incinération traditionnelle (voir **Fig. IV.11**). Dans ce cas, les rendements énergétiques sont beaucoup plus faibles et quelquefois nuls. Les émissions de CO<sub>2</sub> correspondantes viennent alors s'ajouter à celles dues à la fabrication des ciments, et des déchets ultimes sont placés en décharge sans aucune valorisation en produisant parfois même du méthane, autre gaz à effet de serre [54]. En définitive, toute utilisation de déchet comme combustible pour

la fabrication des ciments est une « valorisation », souvent préférable d'un point de vue écologique à l'élimination car elle permet des économies d'énergie et la diminution des émissions de CO<sub>2</sub>. En effet, cette technique a été adoptée par plusieurs pays européens et depuis plusieurs années. Nous donnons ici l'exemple de la France, où 950000 tonnes de déchets énergétiques sélectionnés pour leur compatibilité avec le procédé cimentier ont été valorisées en 2014 en remplacement de combustibles fossiles, ce qui a permis d'économiser l'importation de plus de 500000 TEP (Tonne Equivalent Pétrole). Alors, en suivant l'évolution de la nature des combustibles alternatifs, l'industrie cimentière, dans plusieurs pays développés et après des décennies d'expérience dans le domaine, a su adapter ses installations aux différentes formes de combustibles de substitution disponibles (huiles, pneus usagés non réutilisables, résidus de solvants et peintures, farines animales, combustibles solides de récupération (CSR),...etc.). C'est ainsi que la totalité des fours en France par exemple sont aujourd'hui autorisés à valoriser des déchets, avec un rendement énergétique d'environ 95 % pour ce type de combustibles.

À la cimenterie de Béni-Saf, cette valorisation des déchets n'est toujours pas adoptée. L'usine utilise toujours des combustibles de récupération ou encore des matières premières alternatives, principalement le gaz naturel. Ce qui fait de cette usine un grand consommateur d'énergie.

Le développement de la valorisation énergétique des déchets en cimenterie :

- Favorise l'installation d'une écologie industrielle et territoriale,
- Crée des emplois dans les filières vertes locales,
- Participe à la réduction en consommation énergétique de la cimenterie.

Des systèmes incitatifs et vertueux doivent être mis en place pour éviter l'enfouissement, encore trop couramment pratiqué, de déchets à pouvoir énergétique qui ne doivent plus être considérés comme des déchets ultimes.

#### **IV.3.2. Les combustibles de substitution (Combustibles issus de déchets)**

En raison de leurs températures élevées des flammes (2000 °C), les fours à ciment ont la capacité d'utiliser des combustibles issus de déchets à haute valeur calorifique (p. ex., des solvants usés, de l'huile usagée, des pneus, des déchets de plastiques et des déchets chimiques organiques dont les pesticides organochlorés désuets, et d'autres matériaux chlorés).

L'utilisation de combustibles solides de récupération (CSR) sélectionnés pour leur compatibilité avec le procédé cimentier n'a pas d'impact sur le maintien de la qualité des ciments qui sont tous des produits normalisés.

Alors, on peut utiliser dans une cimenterie de nombreux combustibles de substitution en lieu et place des combustibles fossiles classiques.

On peut répartir ces combustibles de substitution en deux catégories distinctes :

- La biomasse : boues séchées issues des stations d'épuration, vieux papiers, sciures de bois, farines et graisses animales...etc.
- Les déchets : pneus déchiquetés, bois de palettes, résidus de broyage automobile, huiles usagées, plastiques, solvants, ...etc.

Pour un début et pour un essai primaire dans la cimenterie de Béni Saf, il est préférable d'abord de valoriser les déchets produit à proximité de cette cimenterie, dont les huiles usagées, les pneus déchiquetés, les bois de palettes, les bous séchées des stations de dessalement de proximité,...etc.

En outre, l'utilisation de combustibles provenant de déchets peut résulter en des émissions de composés organiques volatils (COV), de fluorure d'hydrogène (HF), de chlorure d'hydrogène (HCl) et de métaux toxiques et leurs composés, si ces combustibles ne sont pas utilisés et contrôlés de manière adéquate [24].

Pour pouvoir utiliser des combustibles issus de déchets ou de matières premières pour fabriquer du ciment, il est nécessaire d'obtenir un permis spécial de la part des autorités locales. Le permis doit spécifier les types de déchets qui peuvent être utilisés en tant que combustibles ou matières premières, et il doit également inclure des normes qualitatives telles que la valeur calorifique minimale et les niveaux de concentration maximums d'agents polluants spécifiques comme le chlore, le mercure et d'autres métaux lourds.

Les techniques de prévention et de maîtrise recommandées pour ces types de polluants atmosphériques consistent, à :

- Mettre en application des techniques d'atténuation des MP pour réduire les émissions de métaux lourds non volatils, et gérer les déchets de matériaux capturés en tant que déchets dangereux ;
- Déployer des mesures de surveillance et de maîtrise de la teneur en métal lourd volatil des matériaux entrants et des combustibles provenant de déchets, en sélectionnant les matériaux utilisés.
- Placer les combustibles qui ont des métaux volatils ou des concentrations élevées de COV directement dans le brûleur principal, plutôt que par le biais des brûleurs secondaires;
- Éviter d'utiliser des combustibles qui ont une teneur élevée d'halogènes au cours de la combustion secondaire et pendant les phases de démarrage et de fermeture [24];
- Instaurer des pratiques de stockage et de manutention adéquates pour les déchets dangereux et non dangereux destinés à être utilisés en tant que combustible ou matières premières issus de déchets.

### **IV.3.3. Consommation d'énergie et de combustibles**

Les industries du ciment consomment une grande quantité d'énergie. Les coûts en matière d'énergie électrique et de combustible peuvent représenter entre 40 et 50 % des coûts totaux de production.

Les besoins en énergie des cimentiers sont connus aujourd'hui : il faut entre 3000 et 4200 MJ pour fabriquer une tonne de clinker en voie sèche auxquels s'ajoutent encore 324 à 468 kWh d'énergie électrique lors de la mouture du ciment [55]. Ceci explique le souci permanent des cimentiers en matière d'amélioration de leur efficacité et ce afin de réduire la consommation d'énergie par tonne de ciment.

À titre d'exemple, des statistiques sur la consommation moyenne de chaleur et d'électricité dans les différents fours utilisables sont indiquées dans le chapitre II (voir **Tab. II.4, II.5 et II.6**).

La valorisation énergétique des CSR est une logique gagnante à plusieurs titres. En France par exemple, elle apporte un bénéfice environnemental en diminuant d'environ 50000 t/an les émissions de CO<sub>2</sub> résultant de la consommation énergétique des cimenteries françaises (2008).

Il faut noter que ce type de recyclage s'opère dans un cadre réglementaire très strict :

Toujours dans une logique de développement durable, la valorisation énergétique des CSR est une solution pour traiter les résidus d'autres industries, de préférence situées à proximité des cimenteries.

La valorisation énergétique totale des déchets permettra, par exemple, d'éliminer près de 30 % du total des pneus usagés en Algérie. Parallèlement, l'utilisation de ces combustibles de substitution génère une réduction de la consommation de combustibles fossiles traditionnels (gaz Propane) utilisés pour la production de ciments.

En 2010, des estimations en Europe montrent que 27 % de l'énergie calorifique nécessaire à la fabrication de ciments, provenait de la valorisation des déchets [56].

Au final, celle-ci s'inscrit dans une "économie circulaire" qui s'efforce, de ne pas épuiser les ressources tout en permettant de contrôler les déchets et les rejets. C'est un exemple très concret d'écologie industrielle.

#### **IV.3.4. Comment utiliser les déchets pour produire du ciment ?**

La haute température des flammes (jusqu'à 2000 °C) dans les fours de cimenteries permettent une destruction totale des molécules organiques, même complexes. Ces fours à ciment ont donc la capacité d'utiliser des combustibles issus de déchets à haute valeur calorifique (par exemple; des solvants usés, de l'huile usagée, des pneus, des déchets de plastiques et des déchets chimiques organiques, les pesticides organochlorés désuets et d'autres matériaux chlorés). Alors, à l'heure actuelle, dans les pays développés, les fours à ciments sont alimentés par des combustibles fossiles et des déchets. Si l'on ajoutait une tonne de déchets supplémentaire à ce processus, la quantité totale de ciment produit

n'augmenterait pas, la tonne de déchets venant en effet simplement se substituer à une partie des combustibles fossiles.

L'ajout d'une tonne de déchets modifierait légèrement l'ensemble des émissions atmosphériques, en fonction des éléments présents dans les déchets et du type de combustible fossile qu'ils remplacent.

Par exemple, si les déchets contiennent moins de soufre que le combustible fossile qu'ils remplacent, les émissions de soufre dans l'atmosphère diminueront [57], ce qui entraînera moins de pluies acides.

#### IV.3.5. Comment incinérer les déchets industriels ?

Les incinérateurs de déchets se composent d'une chambre de combustion dans laquelle les déchets sont brûlés à haute température, d'une chaudière à vapeur qui récupère, sous forme de vapeur, une partie de l'énergie contenue dans les déchets, et d'une turbine à vapeur qui transforme partiellement la vapeur en électricité. De plus, on extrait des gaz générés la poussière et les substances chimiques toxiques avant de les libérer dans l'atmosphère.

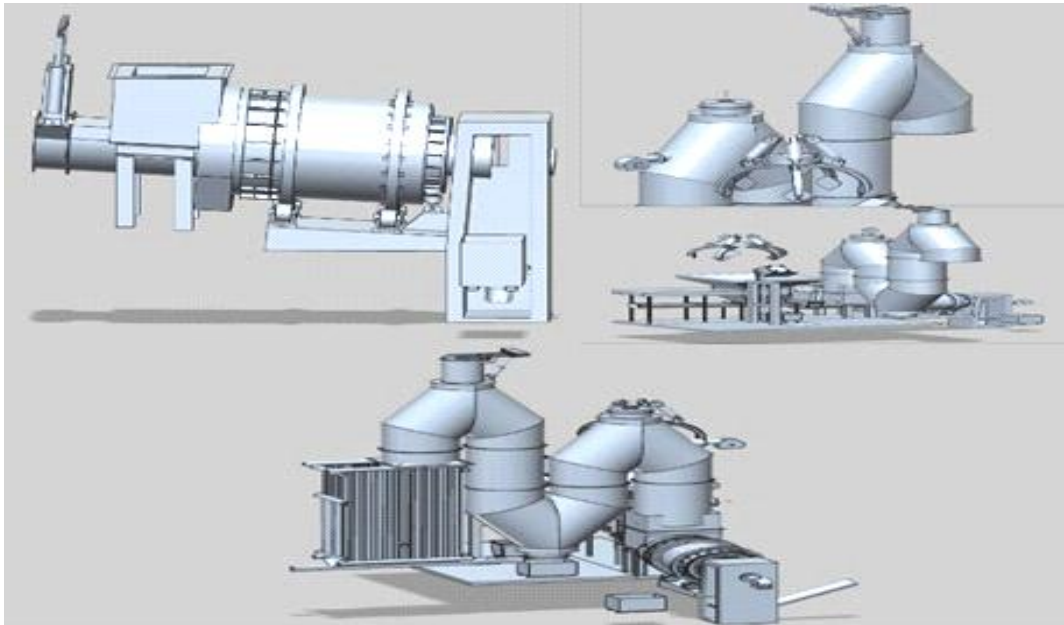
Ce processus d'épuration des gaz de combustion peut parfois entraîner un rejet d'eaux usées dans les eaux de surface. Les cendres et les autres résidus solides résultant de l'incinération sont en général stockés dans des sites d'enfouissement des déchets [57].

Le type d'incinérateur le plus approprié dépend du type de déchet :

- L'incinérateur à four rotatif (voir **Fig. IV.10**) convient pour la plupart des types de déchets pris en considération (solvants et huiles usagées, gâteaux de filtration, et résidus de peinture et d'encre). Près d'un quart de l'énergie contenue dans ces déchets est récupérée grâce à ce système, principalement sous forme de vapeur. Son système d'épuration des gaz à l'eau provoque un rejet d'eaux usées dans les eaux de surface.
- L'incinérateur à lit fluidisé convient mieux au fluff et aux boues d'épuration. Plus d'un tiers de l'énergie contenue dans ces déchets est récupérée grâce à ce système sous forme de vapeur et d'électricité.

Pour les deux méthodes de traitement, l'utilisation d'une tonne de déchets produit une énergie qui réduirait en revanche le besoin global d'électricité et de vapeur et qui aurait été fournie par d'autres sources sans l'ajout de cette tonne de déchets, notamment par des combustibles fossiles qui contribuent au réchauffement de la planète.

Alors, d'après les types de déchets qu'on trouve à proximité de la cimenterie de Béni-Saf il est préférable d'utiliser l'incinérateur à four rotatif (voir **Fig. IV.10**).



**Fig. IV.10.** Incinérateur à four rotatif [58]

L'incinérateur à four rotatif est fabriqué avec une chambre de combustion rotative qui maintient les déchets en mouvement, ce qui lui permet de se vaporiser pour faciliter la combustion.

Parmi les caractéristiques de ce type d'incinérateur on trouve :

- Les déchets tournent dans ce type de four, permettant le mélange avec de l'air,
- Température de fonctionnement de 800 - 1400 °C,
- Haute résistance aux températures élevées,
- Peut gérer des liquides, boue, solides, gaz en grandes quantités,

La conversion en électricité est toujours très attrayante. Mais elle est aussi la plus compliquée et moins économiquement rentable pour les petites installations (le min. Capacité est de 3 tonnes/h de déchets) [58].

Mais aussi par cet incinérateur nous produisons de la vapeur comme récupération d'énergie, la chaleur ou bien la vapeur produite peut être utilisée dans un autre procédé sur place, par exemple dans un évaporateur/sécheur, ou même pour un préchauffage des matières premières. Il doit être pris en considération ainsi la connexion entre l'incinérateur et le processus de production et donc ça peut être la solution la plus efficace pour la cimenterie de Béni-Saf dans le but de réduire de sa consommation énergétique.

#### IV.3.6. Protocole de contrôle, sécurité et qualité

L'utilisation de déchets est soumise à des procédures et des conditions particulièrement très strictes d'acceptation, et à l'aptitude du procédé cimentier à détruire chaque type de déchets sélectionnés en toute sécurité.

Ces procédures permettent de s'assurer de la conformité du déchet au cahier des charges, afin de garantir la sécurité des employés et des riverains des cimenteries et le maintien de la qualité des ciments produits.

Les éléments métalliques présents à l'état de traces sont fixés de manière complète et irréversible dans les ciments et les bétons, quel que soit le combustible utilisé lors de la fabrication des ciments [59].

Il faut mettre en parallèle des contrôles permanents, ils doivent être menés par le laboratoire de la cimenterie, ainsi des mesures systématiques doivent s'effectuer à la sortie du cheminé. L'ensemble de ces mesures a pour objectif de garantir le maintien de la qualité des ciments.

Pour la grande majorité des impacts environnementaux, l'étude démontre qu'il est moins nocif pour l'environnement d'utiliser les déchets industriels comme combustible de substitution pour la production de ciment que de les traiter dans des incinérateurs de déchets [57].

#### IV.3.7. Les avantages de la valorisation énergétique des déchets

- Préservation des combustibles d'origine fossiles, car l'utilisation des déchets en cimenterie réduit l'importance de combustibles fossiles non renouvelables dont elle est fortement consommatrice. Par conséquent, utiliser les déchets comme combustible de substitution pour la production de ciment permet d'épargner d'avantage de combustibles fossiles [59].
- Les hautes températures des fours de cimenterie permettent une destruction totale des molécules organiques, même complexes, des déchets. Il n'y a donc pas de risque de pollution lié à la valorisation de déchets en cimenterie [57]. En France par exemple, plus de 1/3 de l'énergie calorifique utilisée aujourd'hui pour la fabrication des ciments provient de la combustion de déchets, économisant annuellement l'importation de plus de 500.000 tep (Tonne Équivalent Pétrole) [43].
- C'est une Valorisation de manière optimale. Les déchets étant directement au contact de la flamme, toute l'énergie libérée est utilisée. L'efficacité ou Le rendement énergétique de cette valorisation peut atteindre les 70 %. Et ce, sans aucun déchet ultime [56].
- Le procédé cimentier en utilisant des déchets en cimenterie, n'engendre ni cendre ni mâchefer à placer en décharge : il est zéro déchet.

- Participer à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. S'ils n'étaient pas recyclés en cimenterie, ces déchets seraient éliminés par la voie de l'incinération traditionnelle (voir Fig. IV.11).

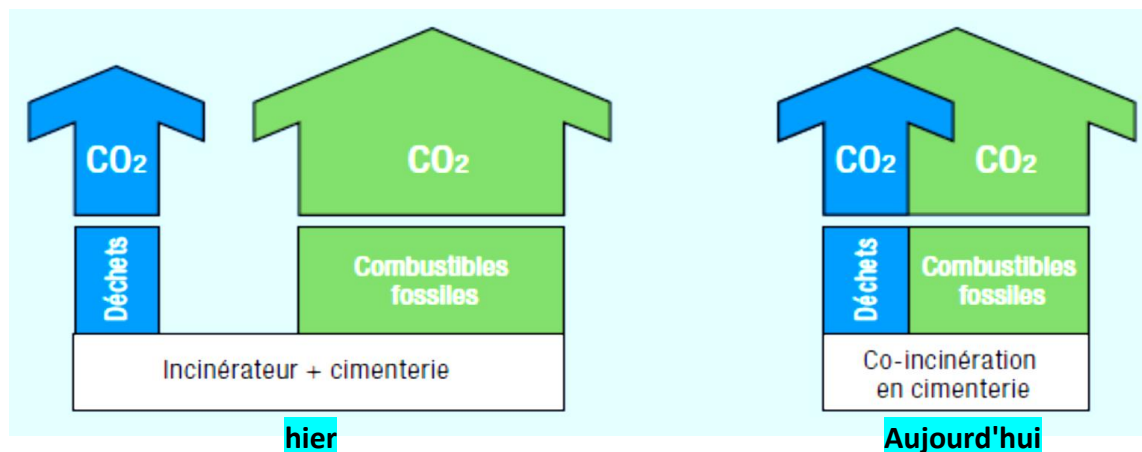


Fig. IV.11. Co-incinération en cimenterie [43]

Si les déchets seraient éliminés par la voie de l'incinération traditionnelle. Dans ce cas, les rendements énergétiques sont beaucoup plus faibles et quelquefois nuls. Les émissions de CO<sub>2</sub> correspondantes viennent alors s'ajouter à celles dues à la fabrication des ciments, et des déchets ultimes sont placés en décharge sans aucune valorisation en produisant parfois même du méthane, autre gaz à effet de serre.

#### IV.3.8. Conclusion

Outre sa contribution à la réduction globale des émissions de CO<sub>2</sub>, cette valorisation énergétique des déchets en cimenterie présente des avantages majeurs pour l'environnement. Il faut donc un effort collectif des pouvoirs publics et des industriels pour se mobiliser pour l'adoption de cette procédure (substitution des combustibles) dans la cimenterie de Béni Saf.

En définitive, toute utilisation de déchets comme combustible pour la fabrication de ciment est une «valorisation», souvent préférable d'un point de vue écologique pour l'élimination, car cette méthode conduit à une réduction dans la consommation énergétique et dans les émissions de CO<sub>2</sub>.



## IV.4. Blade Compressor (Compresseur à lame)

### IV.4.1. Introduction

Bien que certaines usines utilisent le transport mécanique, beaucoup utilisent des systèmes d'air comprimé car ils permettent de transporter des produits facilement et rapidement.

Certains compresseurs sont souvent inefficaces car les pièces tournantes ne sont pas bien scellées, ce qui permet à l'air de fuite pendant le processus de compression. Et, malgré les améliorations apportées pour minimiser la perte, la géométrie fondamentale des compresseurs existants est finalement un facteur limitant [60].

Les grandes entreprises de ciment peuvent consommer quelque 6000 GWh de puissance. En outre, 35 500 000 GCal de chaleur pour un total de 5Mt/an. L'innovation révolutionnaire de la société Lontra (situé en Angleterre), qui est le compresseur à lame, offre un changement de rentabilité et des avantages associés à la production, à l'entretien et au coût du cycle de vie [61].

Le Blade Compressor (compresseur à lame) est innové par Steve Lindsey qui est un inventeur de Royaume Uni à partir de la société Lontra, il a déjà utilisé ce système dans une usine des traitements des eaux usées. Autres marchés possibles pour cette technologie comprennent les produits pharmaceutiques, la pisciculture et Industries de procédés comme le ciment et noir carbone.

### IV.4.2. Définition d'un compresseur

Les compresseurs sont un composant clé dans les systèmes de transport pneumatique (voir **Fig. IV.12**) et sont omniprésents dans de multiples industries. Ils se trouvent dans les usines de ciment et de chaux, les usines chimiques et industrielles, les usines de traitement des aliments et les centres de traitement de l'eau, entre autres.

Les applications des compresseurs sont si larges que tous, nous contactons involontairement chaque jour. Ils soumettent les denrées alimentaires aux paquets avant de les ouvrir à nouveau. Ils rendent nos frigos, et les produits en eux, cool. Ils sont mêmes derrière le son que nous entendons lorsque les portes du train s'ouvrent.

### IV.4.3. Compresseur à piston

La compression de l'air moderne remonte au développement du compresseur à piston au début du 20<sup>ème</sup> siècle.

Comme pour un moteur à essence, ces compresseurs utilisent un piston pour aspirer de l'air dans un cylindre sur la course vers l'extérieur et comprimer cet air après que le piston a renversé son mouvement et qu'il se déplace vers l'intérieur (voir **Fig. IV.12**). Les vannes contrôlent l'entrée et la sortie de l'air. Cependant, il existe plusieurs défauts dans cette conception: un compresseur d'air à piston est bruyant, les vannes et les joints d'étanchéité ne sont jamais étanches et, de façon cruciale, ils ne compriment que de l'air sur la course

vers le bas du piston. La moitié du mouvement du compresseur à piston est essentiellement une énergie gaspillée.

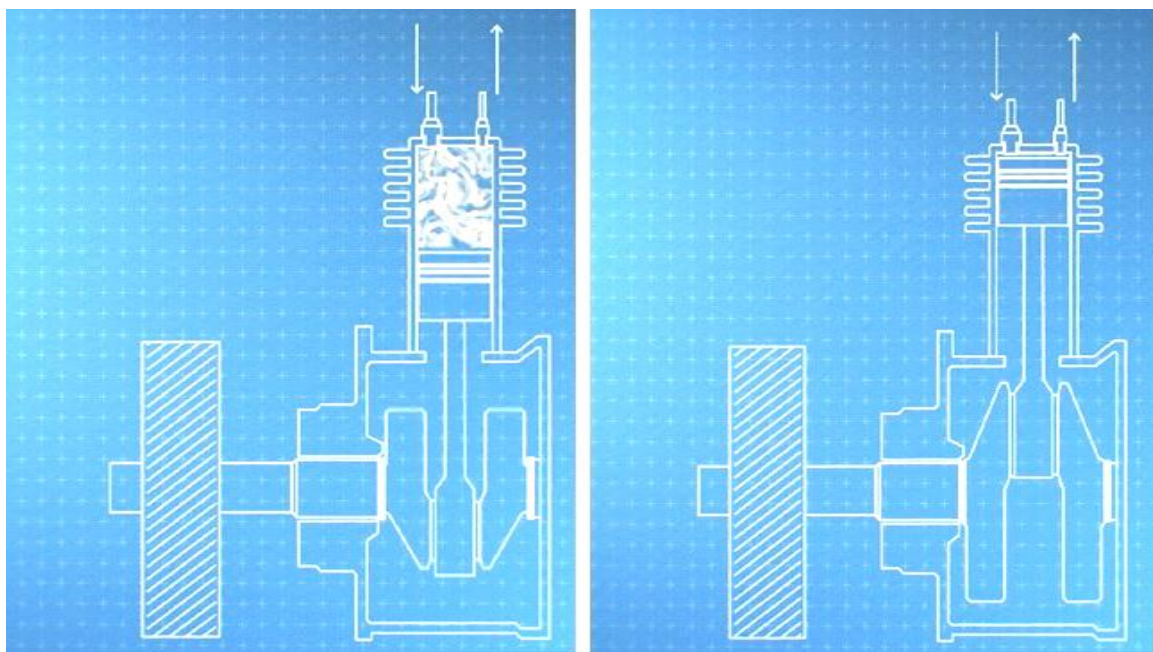


Fig. IV.12. schéma d'un compresseur d'air à piston

#### IV.4.4. Transport pneumatique dans la cimenterie de Béni Saf

Les systèmes de transport pneumatique à pression négative et positive sont habituellement utilisés pour transmettre du volume solide à partir d'une position de départ (généralement des silos de stockage) à un autre (généralement des silos ou processus de tampon). Grâce au flux d'air et à la pression accumulée dans la tuyauterie, les objets solides flottent et sont manipulés vers le point de destination où ils sont séparés.

Dans la cimenterie de Béni Saf les compresseurs sont utilisés pour le transport pneumatique de la farine crue. Ils récupèrent les poudres issues du broyage et séchage qui sont envoyées vers les silos "farine crue" en voie sèche ou vers le mélange des pâtes.

Il existe deux types de compresseur à piston dans la cimenterie de Béni Saf.

- Le premier compresseur transporte la matière à quatre mono pistons reliés à un vilebrequin par l'intermédiaire de bielles qui sont entraînés par un moteur électrique. La pression de sortie qui est de 2,5 bars (voir Fig. IV.13),
- Le deuxième, est un compresseur asservissement ou utilité avec deux mono pistons, un grand piston et un petit piston, ou en terme théorique; piston HP (haute pression) et piston BP (basse pression), la pression de sortie est de 7 bars pour instrumentation, flamme...etc.

Alors, nous avons constaté que le compresseur à quatre mono pistons 2,5 bars forment un étage BP et le compresseur 7 bars HP/BP forment deux étages.

Le compresseur fournit l'air comprimé nécessaire au transport des matériaux depuis les silos par des conduites. Pour garantir un débit constant dans les conduites et les convoyeurs pneumatiques, il est nécessaire de surveiller avec fiabilité la pression au niveau des compresseurs et dans le circuit pneumatique.

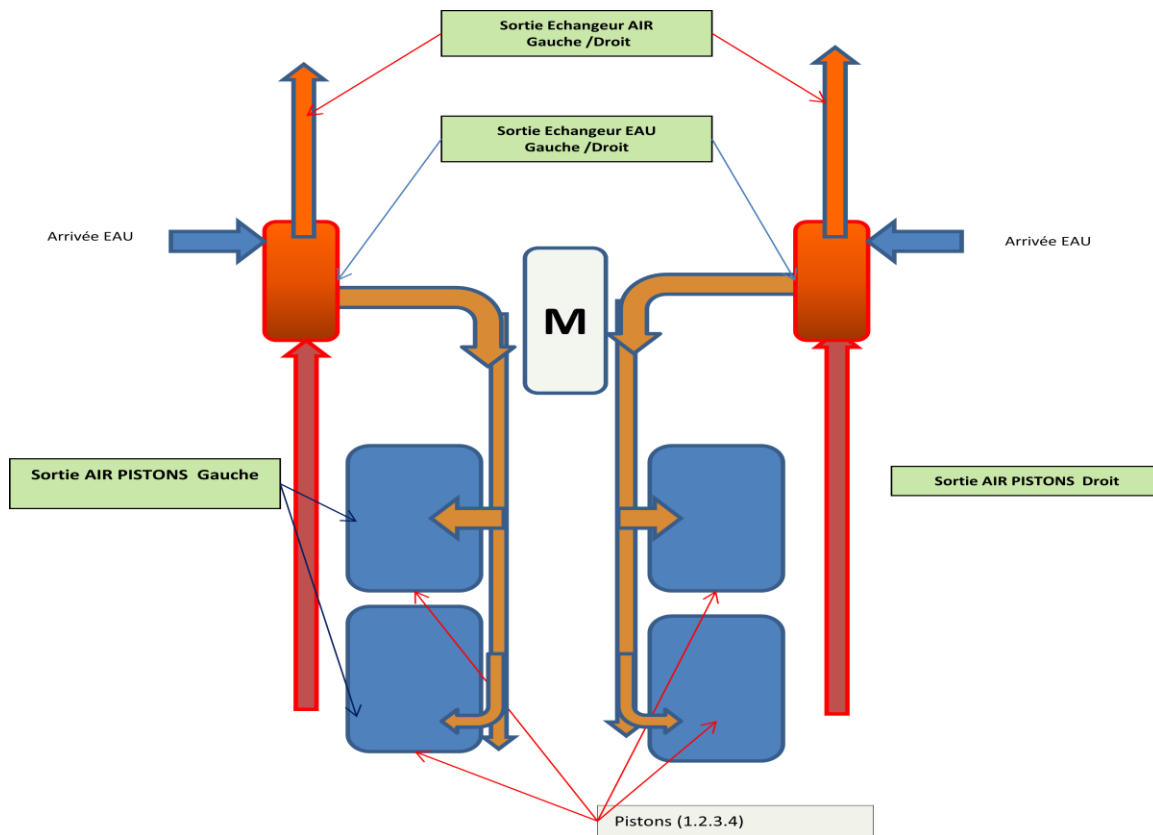


Fig. IV.13. Compresseur 2,5 bar ATLAS utilisé dans SCIBS

## IV.4.5. La nouvelle technologie pour remplacer le compresseur à piston

### IV.4.5.1. Définition d'un compresseur à lame

Blade Compressor (compresseur à lame) est un compresseur rotatif à double effet sans huile, dont la caractéristique principale est une lame rotative qui traverse une fente dans un disque rotatif sur chaque révolution (voir **Figs. IV.14** et **IV.15**) [62].

Sa géométrie donne une compression interne avec des fuites très faibles et de faibles pertes d'écoulement d'entrée et de sortie. Cela permet une large gamme de fonctionnement efficace et pour que le compresseur soit directement couplé à un moteur industriel standard, plutôt que d'exiger une boîte de vitesses ou un lecteur de courroie. Le compresseur rotatif double effet résultant fonctionne avec une efficacité supérieure à 20 %, par rapport aux conceptions précédentes [63].

Une installation pilote du compresseur, réalisée en partenariat avec Severn Trent Water et avec le soutien de Carbon Trust, a vu une réduction de 3 % des émissions totales de carbone de l'entreprise après une opération d'une année dans ses Travaux de traitement des eaux usées de Worcester.

Sa fiabilité offre des réductions supplémentaires des coûts de fonctionnement dans les industries à forte intensité énergétique telles que l'aération de l'eau et le transport pneumatique [63].

Le Blade Compressor est mieux imaginé comme un piston et un cylindre, mais avec le cylindre enroulé autour de lui (voir **Figs. IV.14** et **IV.15**). Avec une machine à piston et un cylindre traditionnelle, au fur et à mesure que le piston tombe dans le cylindre, il tire de l'air au-dessus et, à mesure qu'il remonte, il répète l'air devant lui.

Dans le "Lontra Blade Compressor" il y a un port d'admission constamment ouvert, sans vanne. Au fur et à mesure que le piston (ou lame) tourne, il tire de l'air derrière lui de la même manière que le piston descend dans le cylindre.

Comme il revient au point de départ, il a dessiné dans un volume d'air complet derrière lui. Cependant, un piston et un cylindre traditionnel, semblable à celui qui doit s'arrêter et changer de direction, la lame passe par un disque et le volume d'air qui a été piégé derrière la lame est maintenant en face (voir **Fig. IV.15**).

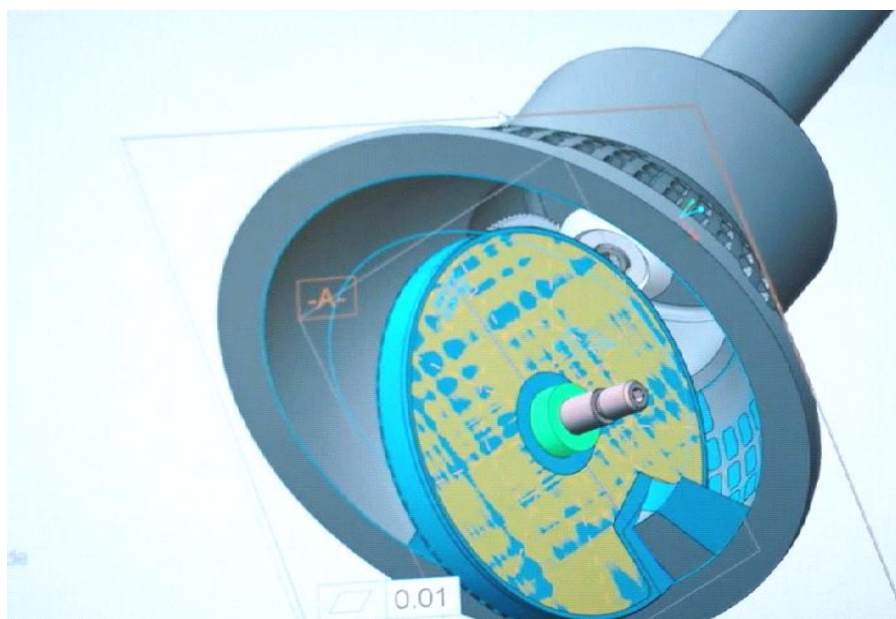
Cela signifie qu'il y a un cycle presque continu de dessiner de l'air derrière et de comprimer l'air devant. C'est une nouvelle géométrie plus silencieuse, plus lisse et surtout plus efficace.

### IV.4.5.2. Une nouvelle prise sur un vieux problème

Comme solution efficace, nous proposons à la cimenterie de Béni Saf d'utiliser un compresseur à lame qui est contrairement à un compresseur à piston traditionnel, qui doit s'arrêter et changer de direction, l'appareil de Lindsey comporte une lame tournant sans fin dans une direction, ne s'arrêtant jamais et ne démarre pas. Cela le rend considérablement plus doux, plus silencieux et plus fiable. C'est aussi la première nouvelle technologie de

compression qui est intrinsèquement sans huile et, en tant que telle, elle fuit beaucoup moins [64].

Cette technologie peut être utilisée dans le transport pneumatique, le transport de matériaux secs, granulés dans des industries allant du ciment et des aliments et boissons, à l'agriculture, aux produits pharmaceutiques et aux produits chimiques. Il est à moindre étonnement que l'on s'attend à ce que son utilisation s'accroît avec une attention accrue à la gestion de la qualité des produits et aux exigences d'hygiène.



**Fig. IV.14.** Le design du nouveau compresseur (compresseur à lame)[63]

Lindsey's Blade Compressor s'améliore sur chacune de ces faiblesses de conception. Il comporte une lame de piston rotative dans une chambre circulaire qui comprime simultanément l'air et induit de l'air neuf dans la chambre en un mouvement continu. Lorsque la lame se déplace dans la chambre, elle induit de l'air derrière elle et comprime l'air devant. L'air comprimé est relâché juste avant que la lame du piston ne glisse dans une fente dans un disque tournant (voir **Fig. IV.15**), ce qui coupe la chambre: l'air qui était derrière le piston est maintenant en face de celui-ci et est comprimé alors qu'il y a plus d'air tiré de ce qui est maintenant Derrière la lame [61].

#### **IV.4.5.3. Principe de fonctionnement**

Ce compresseur devait être le premier à fonctionner entièrement sans huile et à ne pas perdre d'air comprimé, donc une machine bien plus performante et même moins chère à fabriquer. C'est une solution plus verte à la technologie de compression traditionnelle.

Au lieu de déplacer un piston d'avant en arrière dans un cylindre, le compresseur à lames utilise une lame à piston dans une chambre annulaire (circulaire). Au fur et à mesure que la



lame parcourt la chambre, elle enfonce l'air derrière elle à travers une entrée tout en comprimant l'air devant (voir **Fig. IV.15**). L'air comprimé est relâché juste avant que la lame du piston ne glisse dans une fente dans un disque tournant, ce qui coupe la chambre: l'air qui était derrière le piston est maintenant en face de celui-ci et est comprimé alors que plus d'air est tiré de ce qui est maintenant derrière la lame [65].

Dans un essai avec Severn Trent Water, Blade Compressor a livré des économies d'énergie de plus de 21% et une réduction de 3 % de la facture énergétique de l'entreprise. L'essai a également démontré une meilleure fiabilité du compresseur et un besoin réduit de maintenance si tous les compresseurs basse pression de l'entreprise ont été remplacés par Blade Compressor [66].



**Fig. IV.15.** Le fonctionnement du compresseur à lame [65]

Dessine et comprime l'air simultanément, c'est l'avantage d'efficacité du compresseur de lame sur la compression traditionnelle du piston. Sa conception offre également un très bon scellage, réduisant les fuites d'air et entraînant des améliorations significatives de l'efficacité et, par conséquent, une réduction de la consommation d'énergie.

#### IV.4.5.4. Comment le compresseur à lame pourrait révolutionner l'industrie du ciment ?

L'air comprimé dans la cimenterie de Béni Saf permet aux fabricants de transmettre le produit facilement et rapidement à travers des systèmes de transport pneumatique, qui utilisent généralement un pipeline simple, de diamètre relativement petit, pour transférer le matériau. Cela garantit que la poussière ne s'échappe pas et que la qualité du produit est maintenue.

Les avantages de cette innovation ont déjà été éprouvés dans l'industrie des eaux usées, où les compresseurs à basse pression, de type très similaire à ceux utilisés dans l'industrie du ciment, travaillent 24 heures sur 24h pour aérer les eaux usées.

Compte tenu du coût de la consommation d'électricité et des émissions de CO<sub>2</sub> associées, Severn Trent Water qui a utilisé ce compresseur depuis 2012 a étudié des solutions alternatives avec des coûts d'énergie plus faibles, une efficacité opérationnelle améliorée et un impact environnemental réduit.

Donc d'après les résultats obtenus à partir de Severn Trent Water (société des traitements des eaux usées) l'extension de l'essai a démontré une amélioration de la fiabilité, ainsi qu'une réduction du besoin de maintenance. Comme pour de nombreuses industries, la réduction des temps d'arrêt et une fiabilité accrue sont aussi intéressantes que l'économie d'énergie. Suite à la démonstration, la société a signé un accord mondial de titulaire de licence pour le marché des eaux usées municipales. Des économies similaires sont prévues dans d'autres industries, y compris l'industrie du ciment.

Sur la base des essais éprouvés au Royaume-Uni pour la technologie des compresseurs d'air et ces statistiques, les entreprises mondiales de ciment pourraient utiliser 3606 Wh/an de puissance pour l'air comprimé. En outre, une efficacité énergétique de 20 % pourrait fournir une économie de 72 GWh/an pour les entreprises, ce qui permet d'économiser en monnaie [65].

Le compresseur à lame fonctionne depuis plus de 10000 heures, l'équivalent de plus de trois ans de fonctionnement normal, sans problème. Cela nous donne une grande confiance dans sa fiabilité pour l'utiliser dans la cimenterie de Béni Saf en remplaçant les compresseur à piston.

#### IV.4.6. Conclusion

D'après l'utilisation de ce systèmes; "le compresseur à lame", et dans le but de réduire la consommation d'énergie, nous avons remarqué que ce système est très efficace, fiable, moins couteux, avec un besoin réduit de maintenance et des temps d'arrêt et avec une fiabilité accrue.

Comme on a précisé dans les paragraphes précédents le compresseur à lame fonctionne depuis plus de 10000 heures, l'équivalent de plus de trois ans de fonctionnement normal,

sans problème. Cela nous donne une grande confiance dans sa fiabilité pour l'utilisé dans la cimenterie de Béni Saf en remplaçant les compresseur à piston. Selon les études antérieurs, ce système peut fournir une efficacité énergétique d'environ 20 %.

#### IV.5. L'estimation possible de consommation d'énergie

Il existe plusieurs méthodes de planification; La planification permet entre autre de faire plusieurs choses importantes :

- Fixer des objectifs.
- Prendre immédiatement des décisions qui ont un certain délai de mise en œuvre et qui permettront d'atteindre les objectifs.
- Communiquer le plan afin que l'environnement puisse s'adapter à la planification choisie.

On va choisie quelque une et on les appliquer dans notre projet pour avoir un résultat concernant la réduction en consommation d'énergie dans la cimenterie de Béni saf

##### IV.5.1. la méthode des moindres carrés

Cette méthode est utilisée pour connaître l'équation d'une tendance par rapport à des valeurs d'historique.

Les coefficients fixes a et b sont déterminés par la méthode des moindres carrés

Les formules de calcul des coefficients sont :

$$X = x - \bar{x} \qquad a = \frac{\sum X.Y}{\sum x^2}$$

$$Y = y - \bar{y} \qquad b = \bar{y} - a \bar{x}$$

L'application de la méthode :



1) On remplit le tableau

**Tab. IV.2.** les valeurs de la facture de consommation d'énergie mensuelle et annuelle

Année	1	2	3	4	5	6
VFCM	40000000	38000000	45000000	39000000	42000000	40083000
VFCA	480000000	456000000	540000000	468000000	504000000	480996000

$$VFCA = VFCM * 12$$

**Tab. IV.3.** les différentes étapes de la méthode des moindres carrées

Année	valeur	X	Y		
$x_i$	$y_i$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$X.Y$	$X^2$
Année	Valeur				
1	480000000	-2,50	-2448996000	+6122490000	6,25
2	456000000	-1,50	-2472996000	+3709494000	2,25
3	540000000	-0,50	-2388996000	+1194498000	0,25
4	468000000	+0,50	-2460996000	-1230498000	0,25
5	504000000	+1,50	-2424996000	-3637494000	2,25
6	480996000	+2,50	-2448000000	-6120000000	6,25
Total=21	2928996000			Total=38490000	Total=17,5

Nombre d'années=n=6

$\bar{y}$  : Valeur moyenne de consommation d'énergie =17573976000/6=2928996000

Total= 1+2+3+4+5+6

x moyen= 21/6=3,5

2) On détermine la courbe de tendance et on calcule les valeurs pour la septième année

Graphique de l'historique des consommations d'énergie

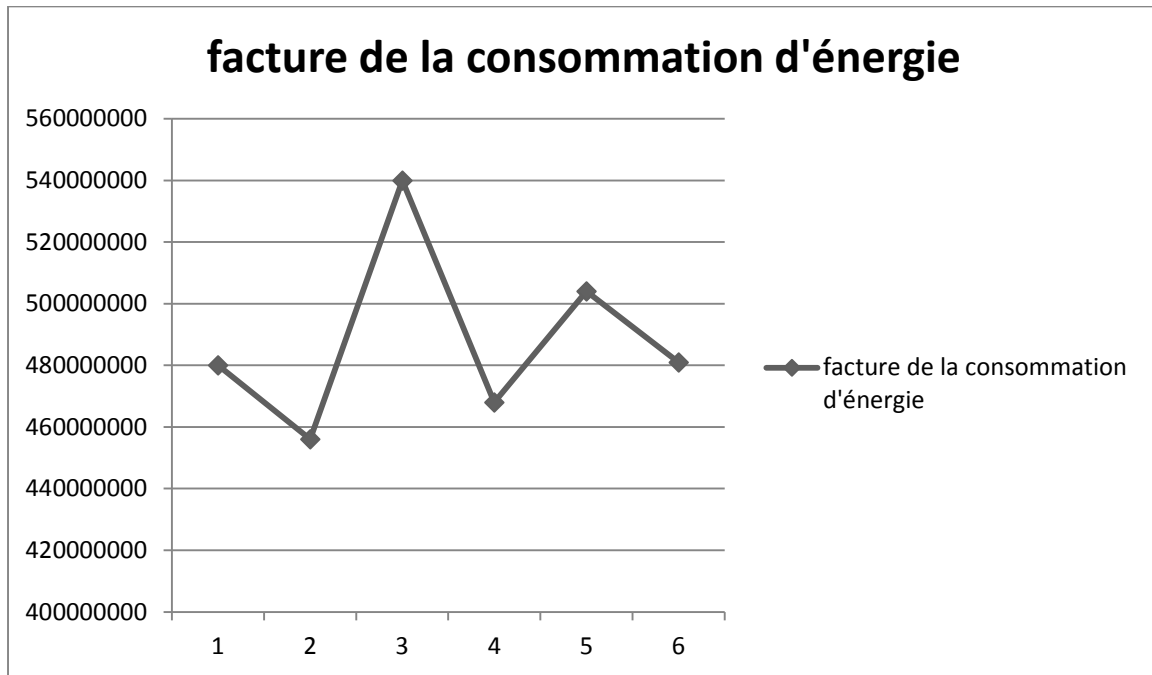


Fig. IV.16. Consommation d'énergie pendant six années

3) Calcul de la valeur du coefficient directeur a :

$$a = \frac{\sum x \cdot y}{\sum x^2} = \frac{38490000}{17,5} = 2199428,57$$

4) Calcul du coefficient b :

$$b = \bar{y} - a\bar{x} = 2928996000 - (2199428,57 * 3,5) = 2921298000$$

5) L'équation de la droite s'écrit :

$$y = 2199428,57x + 2921298000$$

6) les prévisions de la valeur de la consommation d'énergie pour la septième année seront de l'ordre de :

$$y = 2199428,57 * 7 + 2921298000 = 2936694000$$

#### IV.5.2. la méthode de rapport mobile

Dans le cas de consommation d'énergie saisonnière, la méthode du rapport mobile consiste à calculer un coefficient saisonnier pour chaque mois de l'année à partir des données de la période étudiée. On utilise ensuite ce coefficient saisonnier pour estimer la consommation de l'année suivante

Soit la cimenterie de Béni saf où la moyenne de consommation d'énergie a été de 40083000DA par mois durant l'année 2016.

On Calcule l'estimation de consommation d'énergie pour l'année 2017 sachant que l'estimation moyenne des consommations est prévue à 38880510,00DA par mois.

**Tab. IV.4.** l'estimation des factures de consommation d'énergie pendant l'année 2016

Mois	janvier	Février	mars	avril	mai	Juin
valeurs	42000000	44000000	32000000	38000000	44000000	37000000

Mois	juillet	Aout	septembre	octobre	novembre	Décembre
valeurs	41000000	39000000	42000000	43000000	42000000	37000000

Pour trouver une estimation de l'année 2017 en utilise des compresseurs à lame (blade compressor ; utilisés dans l'industrie du ciment, travaillent 24 heures sur 24, livré des économies d'énergie de plus de 21% et une réduction de 3% de la facture énergétique de l'entreprise) qui ce remplacent les compresseurs à piston trouve dans la cimenterie de Béni Saf qui sont utilisés pour le transport pneumatique de la farine crue. Ils récupèrent les poudres issues du broyage et séchage qui sont envoyées vers les silos « farine crue »

Les systèmes de transport pneumatique à pression négative et positive sont habituellement utilisés pour transmettre du volume solide à partir d'une position de départ (généralement des silos de stockage) à un autre (généralement des silos ou processus de tampon). Grâce au flux d'air et à la pression accumulée dans la tuyauterie, les objets solides flottent et sont manipulés vers le point de destination où ils sont séparés.

L'application de la méthode :

- 1) On fait l'estimation de l'année 2017

2) La moyenne de consommation d'énergie en 2016 égale à : 40083000 DA

$$X=40083000*0.03 \quad (3\% \text{ de réduction de la facture énergétique})$$

$$X=1202490$$

3) Alors l'estimation moyenne pour l'année 2017 égale à :

$$40083000-1202490=38880510 \text{ DA}$$

4) Le calcul de coefficient saisonnier :

**Tab. IV.5.** *le calcul des coefficients saisonniers pour chaque mois de l'année 2016*

Mois	1	2	3	4	5	6
QC	42000000/ 38880510	44000000/ 38880510	32000000/ 38880510	38000000/ 38880510	44000000/ 38880510	37000000/ 38880510
CS	1,08	1,13	0,82	0,97	1,13	0,95

Mois	7	8	9	10	11	12
QC	41000000/ 38880510	39000000/ 38880510	42000000/ 38880510	43000000/ 38880510	42000000/ 38880510	37000000/ 38880510
CS	1,05	1,00	1,08	1,10	1,08	0,95

5) La consommation estimée de l'année 2017 (CE) :

X\*CS de chaque mois

**Tab. IV.6.** *la consommation d'énergie estimée pour l'année 2017*

Mois	1	2	3	4	5	6
CE	1298689,20	1358813,70	986041,80	1166415,30	1358813,70	1142365,50

Mois	7	8	9	10	11	12
CE	1262614,50	1202490	1298689,20	1322739	1298689,20	1142365,50

6) Graphique des consommations avec variations saisonnières :

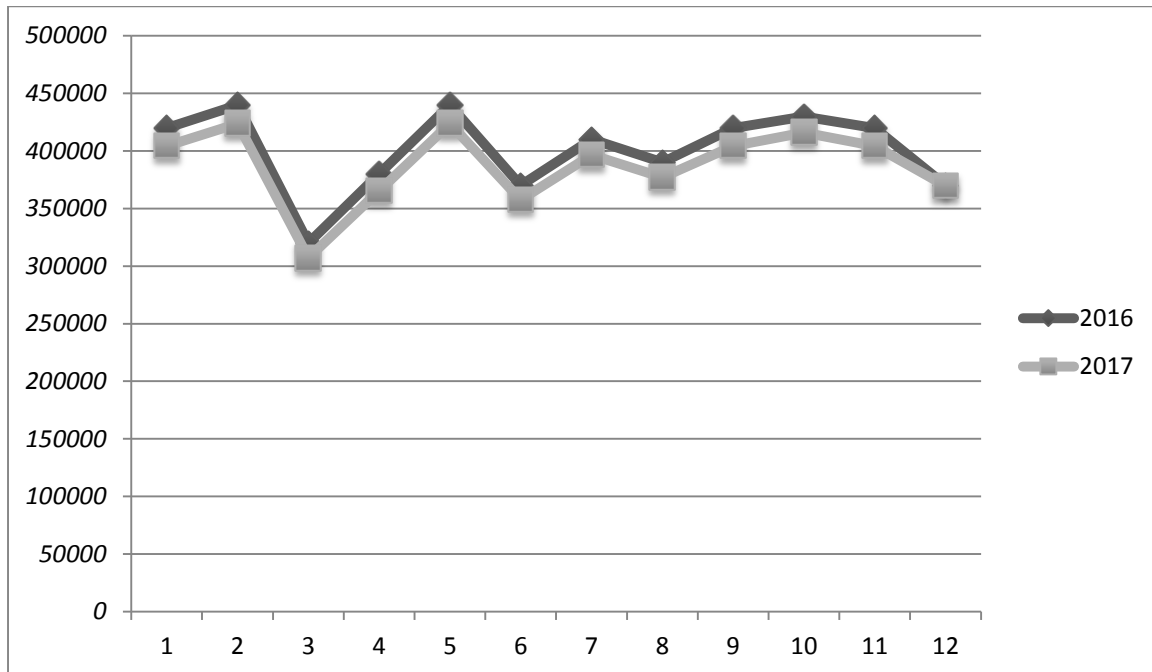


Fig. IV.17. Graphique des consommations avec variations saisonnières

### IV.5.3. Comparaison entre les deux méthodes

D'après les calculs précédents on a trouvé dans la 1<sup>ère</sup> méthode l'estimation de 2017 égale à 2936694000 mais dans la 2<sup>ème</sup> méthode où on a ajouté le compresseur on a trouvé un résultat égale à :

$$1298689,20+1358813,70+986041,80+1166415,30+1358813,70+1142365,50+1262614,50 +1202490,00+1298689,20+1322739,00+1298689,20+1142365,50=14838726.6$$

Cette valeur indique le résultat annuel et pour faire la comparaison il faut qu'on prenne la valeur moyenne alors :

$$14838726.6/12=1236560,55$$

Donc après la comparaison on a conclue que la valeur de la 2<sup>ème</sup> méthode est moins que l'autre et se qu'il présente le rôle efficace de compresseur

## IV.6. Réduction des émissions de poussières canalisées à l'aide des installations de dépoussiérage

Il existe différents points principaux d'émission de poussières dans les cimenteries : les fours, les refroidisseurs à clinker et les broyeurs à matière première, à ciment et à charbon, ainsi que les procédés secondaires. Il est possible de réduire une grande partie des poussières fines en réduisant de la concentration totale de poussière et en utilisant des installations de dépoussiérage à haute efficacité.

Différents systèmes de dépoussiérage ont été utilisés par le passé, mais en 2007 les principaux systèmes de filtration de gaz résiduaires secs utilisés pour la réduction des poussières étaient les filtres à manches, les filtres électrostatiques ou bien une combinaison des deux que l'on appelle les filtres hybrides.

Les filtres électrostatiques et filtres à manches ont leurs avantages et leurs inconvénients. Ils sont tous deux très efficaces dans les conditions de services normales. Dans des conditions spéciales - forte concentration en CO, démarrage ou arrêt du four, passage du fonctionnement compound (broyeur à cru en marche) au fonctionnement direct (broyeur à cru arrêté), les performances des filtres électrostatiques peuvent être diminuées alors que celles des filtres à manches sont moins affectées.

Les filtres électrostatiques et les filtres à manches présentent une efficacité globale élevée, car ils retiennent plus de 99 % des particules et les deux dépendent de la taille des particules. Afin de conserver leur efficacité, les deux types de filtres doivent être dûment entretenus (régulièrement). Il convient d'utiliser différents types d'éléments filtrants en fonction de la température des gaz résiduaires. Les manches ont l'inconvénient de constituer un déchet quand elles sont usées [66].

### IV.6.1. Utilisation des filtres électrostatiques

Ces filtres créent un champ électrostatique au travers de la trajectoire des matières particulaires en suspension dans la veine d'air. Leurs charges électriques deviennent négatives et elles se dirigent vers les plaques collectrices chargées positivement. Celles-ci vibrent ou sont frappées régulièrement, ce qui fait tomber la poussière dans des bacs de récupération placés en-dessous. Il est important d'optimiser les cycles de frappe des filtres électrostatiques pour minimiser le réentraînement des particules et donc limiter le potentiel de voir le panache formé au sommet de la cheminée. Les filtres électrostatiques se caractérisent par leurs aptitudes à supporter des températures élevées (jusqu'à 400 °C environ) et de forts taux d'humidité. Les principaux inconvénients de cette mesure/technique sont une baisse d'efficacité lors de la formation d'une couche isolante et une accumulation de matière causée par l'introduction de chlore et de soufre. Les problèmes de résistivité élevée de la poussière peuvent en partie être résolus par injection d'eau dans des refroidisseurs-évaporateurs. L'utilisation de filtres à manches est une solution permettant également de résoudre cet inconvénient.

Les filtres électrostatiques éliminent non seulement les poussières, mais aussi les substances qui s'adsorbent sur ces particules, comme la dioxine et les métaux, s'ils sont présents. La taille et la consommation électrique des filtres électrostatiques augmentent de façon exponentielle parallèlement à la réduction du niveau de poussières dans les gaz épurés. Le fonctionnement optimal d'un filtre électrostatique dépend de caractéristiques définies du gaz brut, comme sa température et son taux d'humidité. Un filtre électrostatique correctement entretenu peut avoir une durée de vie de plusieurs dizaines d'années [67].

L'effet couronne peut être positif ou négatif selon la charge négative ou positive de l'électrode ionisant. Les électro filtres industriels utilisent presque toujours un effet couronne négatif, car il permet de réaliser des tensions de claquage plus élevées, d'où des vitesses de précipitation supérieures.

La captation des particules dispersées dans le gaz ionisé se réalise en trois étapes successives :

- La charge électrique des poussières ;
- La migration des particules chargées dans le champ électrique vers l'électrode de précipitation (positif) ou elles précipitent par décharge électrique ;
- L'évacuation du gaz purifié et l'élimination des poussières collectées.

#### IV.6.2. Utilisation des filtres à manches

Les filtres à manches sont efficaces pour collecter les poussières. Le principe de base d'un filtre à manches consiste à utiliser une membrane en tissu perméable aux gaz mais retenant les poussières. L'élément filtrant est disposé géométriquement, mais on distingue les manches cylindriques (suspendues verticalement), des poches qui s'installent horizontalement (voir **Fig. IV.18**). Dans un premier temps, les poussières se déposent sur les fibres en surface et à l'intérieur du tissu mais comme une couche de poussière se forme à la surface du filtre, la poussière devient le principal élément filtrant. Les gaz de dégagement peuvent circuler de l'intérieur de la manche vers l'extérieur ou l'inverse. Au fur et à mesure que la couche de poussière s'épaissit, la résistance au passage des gaz augmente ; c'est pourquoi le filtre doit être nettoyé régulièrement pour contrôler la perte de charge dans le filtre. Il existe plusieurs méthodes de nettoyage, mais les plus courantes sont le contre-courant à jets d'air comprimé (filtres à jet d'air pulsé), le frappage ou le battage mécanique et le nettoyage par vibration. Un filtre à manches doit avoir plusieurs compartiments isolés les uns des autres en cas de rupture d'une manche ; elles doivent être suffisamment nombreuses pour que le filtre conserve son efficacité si l'une d'elles est percée. Chaque compartiment doit être muni d'un « détecteur de manche percée » indiquant qu'il faut la remplacer, si nécessaire.

Les manches sont disponibles dans une gamme de tissus tissés et non tissés. Pour les applications à température élevée, il faudra utiliser d'autres tissus que ceux « couramment » disponibles. Il en existe une gamme très satisfaisante. Les tissus synthétiques modernes peuvent supporter des températures assez élevées (jusqu'à 280 °C) [68].



**Fig. IV.18.** Exemple de filtre à manches et de matière filtrante utilisés dans une cimenterie du Royaume-Uni [68]

#### IV.6.2.1. Les performances des filtres à manche

La performance des filtres à manches est fortement influencée par différents facteurs, tels que la compatibilité de l'élément filtrant avec les caractéristiques des gaz résiduels et des poussières, ses propriétés adéquates de résistance thermique, physique et chimique (hydrolyse, acide, élément alcalin et oxydation) et la température. La surface de filtration, l'efficacité de séparation et la résistance à la filtration (autrement dit la « pression différentielle du filtre ») sont autant de caractéristiques importantes pour un filtre. Ces valeurs dépendent des propriétés de l'élément filtrant et des poussières. Le paramètre servant de base à la conception d'un filtre est le débit volumétrique. Il convient donc de définir le degré de filtration qui dépend du type, de la quantité et des propriétés des poussières et du gaz.

Les contraintes thermiques et mécaniques ont une incidence sur la durée de vie, la consommation d'énergie et les besoins d'entretien. Le débit du gaz, l'épaisseur de la couche de poussière, la porosité et le cycle de nettoyage peuvent affecter l'efficacité de traitement des poussières. Des améliorations telles qu'une réduction de la perte de charge dans le filtre, la détection rapide des éventuelles fuites grâce à un contrôle continu et à des détecteurs ainsi que les systèmes de nettoyage prolongent la durée de vie du filtre et font baisser les coûts [68].

Les refroidisseurs à clinker peuvent également bénéficier de cyclones en plus des filtres à manches. Dans un séparateur à cyclones/centrifuge, les particules de poussières à éliminer des effluents gazeux sont projetées sur la paroi extérieure de l'unité par une force centrifuge, puis éliminées à travers une ouverture située au fond de l'unité.

Dans l'industrie du ciment, les cyclones sont associés à un échangeur thermique à air pour abaisser la température et à un filtre à manches pour dépoussiérer par exemple les gaz résiduels de refroidissement. Un cyclone peut réduire la concentration en poussières de 70 % et, combiné avec un échangeur thermique à air et un filtre à manches, il peut atteindre



une efficacité de nettoyage élevée pouvant atteindre 99,99 % avec de faibles niveaux d'émission de 5 à 7mg/Nm<sup>3</sup>. Cette installation requiert toutefois un espace suffisant en raison des grandes dimensions du cyclone (par exemple 25 m de long, 6,4 m de haut et 6,4 m de diamètre) et de l'échangeur thermique associé [68].

Dans ce procédé, les gaz chargés de poussières traversent une surface filtrante qui retient les particules solide. Leur originalité tient à ce que les premières poussières arrêtées sur un support filtrent les poussières suivantes. « Le gâteau » de poussières déposé conduit à une augmentation de la différence de pression, ce qui nécessite la régénération de la surface filtrante à des intervalles de temps dont la grandeur est fonction de la concentration de la phase solide dans le gaz, de la nature du tissu filtrant et de la charge spécifique du filtre.



Fig. IV.19. Montage du nouveau filtre à manche [68]

#### IV.7. Conclusion

Les solutions proposées dans ce chapitre peuvent réduire d'une façon très significative la consommation énergétique ainsi que les émissions de gaz à effet de serre dans la cimenterie de Béni Saf. Mais, afin de pouvoir les appliquer pour résoudre ces problèmes écologiques et économiques, il est important de savoir que le défi est de taille, car l'amélioration des performances énergétiques des usines cimentières nécessite une étude détaillée par ligne de production et par atelier. Les projets de rénovation sont la plupart du temps complexes car ils doivent intégrer tous les aspects de la production associés aux projets de réduction de consommation énergétique (sécurité, environnement, qualité, ...etc.).

Chaque solution est à valider sur le plan technico-économique avec les ingénieurs et constructeurs spécialisés sur l'ensemble des aspects énergétiques, production, qualité et impact sur l'environnement pour pouvoir les réaliser sur terrain.

## **Conclusions et Perspectives**

L'objectif de ce travail était de contribuer à l'étude de la réduction en consommation d'énergie et en émission des gaz à effet de serre et de polluants dans l'atmosphère, qui peuvent se produire par l'industrie cimentaire. Notre étude a été bien menée à la cimenterie de Béni-Saf où nous avons déjà effectué notre stage pédagogique cette année. Alors, nous avons visité successivement cette usine durant plusieurs semaines, afin de pouvoir identifier les meilleures solutions et les plus appropriées pour la cimenterie de Béni-Saf, dans le but de minimiser la consommation énergétique et de réduire les émissions des gaz et des polluants, principalement le dioxyde de carbone.

Une reconnaissance de toutes les étapes de fabrication du ciment, en premier lieu, était nécessaire et de très grand intérêt. Car elle nous a permis de suivre toute la chaîne de production dans la cimenterie de Béni-Saf, de l'excavation en carrière jusqu'à la sortie de produit final (tout le processus), et donc de passer par tous les départements au sein de cette usine. Beaucoup de phénomènes ont été alors découverts, tels que la décarbonatation du calcaire (phénomène chimique) qui est la principale cause des émissions importantes du gaz carbonique par les cimenteries, ainsi que la cuisson des matières premières à des températures élevées (plus de 1450 °C), et le broyage du clinker, qui sont à l'origine de la grande consommation énergétique (électrique et calorifique) pour la fabrication du ciment. Alors, un diagnostic de toute la chaîne de production en cette usine, ainsi qu'une vaste recherche bibliographique, nous ont permis d'identifier tous les systèmes qui peuvent être adoptés par la cimenterie de Béni-Saf pour atteindre les objectifs cités plus haut. Alors, notre étude amène les conclusions suivantes:

- L'installation des batteries de condensation pourra réduire d'une façon très significative la consommation en électricité. Ces batteries de condensateurs ont pour rôle de compenser l'énergie réactive consommée par les équipements électriques (réduire le courant appelé sur le réseau), ce qui permet de réduire significativement la facture de l'électricité consommée par la cimenterie.  
Puisqu'il existe différents types de compensation (globale, partielle et locale), Pour la cimenterie de Béni Saf, nous proposons d'appliquer une compensation locale, où sur chaque consommateur important, on prévoit un condensateur raccordé en parallèle. Il sera mis sous tension uniquement si l'appareil fonctionne.
- L'utilisation des combustibles de substitution comme certains déchets, à potentiel calorifique intéressant, est une des meilleures solutions pour réduire la consommation énergétique et les émissions de CO<sub>2</sub> par l'industrie cimentière. En remplaçant une quantité des combustibles fossiles par des déchets, ce système pourra être très efficace pour la cimenterie de Béni-Saf, surtout en utilisant des combustibles solides de récupération, tels que des déchets textiles, des emballages ménagers, des farines animales, des pneus ou des boues séchées des stations d'épuration.

Cette valorisation énergétique des combustibles solides de récupération en cimenterie, participe non seulement à la réduction en consommation énergétique de la cimenterie, mais aussi à éviter l'enfouissement, encore trop couramment pratiqué, de déchets à pouvoir énergétique qui ne doivent plus être considérés comme des déchets ultimes. Cette valorisation apporte un bénéfice environnemental en diminuant une quantité importante (des milliers de tonnes par an) des émissions de CO<sub>2</sub> résultant de la consommation énergétique de la cimenterie de Béni Saf. Finalement, celle-ci s'inscrit dans une "économie circulaire" qui s'efforce, de ne pas épuiser les ressources tout en permettant de contrôler les déchets et les rejets. Ce système (valorisation énergétique des déchets) est un exemple très concret d'écologie industrielle

- Le remplacement des compresseurs utilisés dans la cimenterie de béni-Saf pour un transport pneumatique, et qui sont des compresseurs à piston, par des compresseurs à lame, récemment innovés par la société Lontra (situé en Angleterre), représente aussi une des solutions importante que la cimenterie de béni-Saf doit adopter. Car, cette innovation révolutionnaire offre un changement de rentabilité et des avantages associés à la production, à l'entretien et aussi au coût du cycle de vie. Selon les études antérieures, ce système peut fournir une efficacité énergétique d'environ 20 %.
- Le système de dépoussiérage est nécessaire pour une cimenterie tel que celle de béni-Saf. Cette dernière dispose déjà d'un système de filtres à manches, mais il pourra être des fuites au niveau de ces filtres. La détection rapide des éventuelles fuites grâce à un contrôle continu et à des détecteurs ainsi que les systèmes de nettoyage, prolongent la durée de vie du filtre et font baisser les coûts. Par ailleurs, pour atteindre une efficacité de nettoyage élevée (99 %) dans la cimenterie de Béni-Saf, il est nécessaire d'installer, au niveau des refroidisseurs à clinker, des cyclones avec des filtres à manches associés à un échangeur thermique à air (pour abaisser la température des gaz de refroidissement), ainsi qu'au niveau de l'unité de stockage du ciment.

Par l'application des solutions indiquées ci-dessus pour la cimenterie de Béni-Saf, objet de cette étude, un gain économique très important pourra être enregistré dans cette société SCIBS (de l'ordre de 40 millions de Dinars par an).

### **Perspectives**

Une des meilleures solutions pour réduire la consommation énergétique (principalement calorifique) d'une cimenterie est la substitution d'une partie de clinker (obtenu par la cuisson des matières premières (calcaire et argile)) par un pourcentage de l'argile. Cette dernière nécessite une cuisson seulement à 800 °C au lieu de 1450 °C qui est une température nécessaire pour l'obtention du clinker. Le produit ciment obtenu par cette méthode est avec des caractéristiques mécaniques (principalement la résistance)

concurrentes à celles obtenues avec un ciment à base du clinker seulement. Ceci a été démontré par des études antérieures menées en Europe.

Une des solutions qui peuvent réduire les émissions du gaz carbonique est le remplacement des camions et des dumpers transporteurs des matières premières vers l'usine par des tapis roulants. L'énergie électrique nécessaire pour les faire en marche est beaucoup moins coûteuse que le carburant consommé par les camions transporteurs qui ont un effet nocive sur l'atmosphère par des dégagements importants du gaz carboniques.

## Références bibliographiques

---

- [1] <https://www.planetoscope.com/matieres-premieres/1708-production-ciment.html>
- [2] Association Canadienne du Ciment: [www.ciment.ca](http://www.ciment.ca)
- [3] [www.svt.ac-versailles.fr](http://www.svt.ac-versailles.fr)
- [4] [www.ens-prof.ac-dijon.fr](http://www.ens-prof.ac-dijon.fr)
- [5] Groupe Industriel des Ciments d'Algérie : Historique de la production du secteur public de ciment, <http://gica.dz/>
- [6] <http://www.ciment.wikibis.com>
- [7] Rapport de stage dans la cimenterie LAFARGE MEKNES.
- [8] Ciments et Bétons; Conception et réalisation, B51 : Am-principe Paris – Édition 2005  
Impression : Gibert-Clarey à Tours
- [9] SEMLALI. Z et GHASSANE. A. Y., "Mise à niveau des méthodes de lubrification des équipements mécaniques". Université Sidi Mohammed Ben Abdellah – Fès : Mémoire de licence, 2013.
- [10] GHOMARI. F. "Science des matériaux de construction". Cour en ligne, site Web - Université de Tlemcen, 2006.
- [11] GHERMAOUI. A. "Effets de certains métaux sur les propriétés physico des mortiers de ciment de Béni-Saf sans ou avec ajout de pouzzolane". Université de Tlemcen : Mémoire de MASTER, 2015.
- [12] [http://www.febelcem.be/fileadmin/user\\_upload/autres-publications/fr/CO2fr.pdf](http://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/autres-publications/fr/CO2fr.pdf)
- [13] <http://doc.lerm.fr/la-fabrication-du-ciment-courant>
- [14] BENHADDA. A. MALTI. O. BENTIFOUR. M. "La société des ciments de Beni Saf (SCIBS)". Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen: Rapport de stage, 2017.
- [15] Manuel d'entretien de la société algérienne des ciments (S.C.I.B.S.), 1994, P1025.
- [16] <http://scibs.dz/>
- [17] <http://www.infociments.fr/publications/industrie-cimentiere/statistiques/st-g-2015>
- [18] [http://www.lasyntheseonline.fr/matieres\\_premieres](http://www.lasyntheseonline.fr/matieres_premieres)
- [19] <http://www.leconews.com/fr/actualites/nationale/industries/gica-produira.php>
- [20] <http://gica.dz/nos-projets/>
- [21] [http://www.huffpostmaghreb.com/2016/11/02/etrhb-ciment\\_n\\_12765498.html](http://www.huffpostmaghreb.com/2016/11/02/etrhb-ciment_n_12765498.html)
- [22] Commission européenne. 2000. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste. Bruxelles: [http://europa.eu.int/eurlex/en/consleg/pdf/2000/en\\_2000L0076\\_do\\_001.pdf](http://europa.eu.int/eurlex/en/consleg/pdf/2000/en_2000L0076_do_001.pdf)
- [23] CSI. 2005. Environmental and Social Assessment Guidelines : [http://www.wbcsd.org/web/publications/cement\\_esia\\_guidelines.pdf](http://www.wbcsd.org/web/publications/cement_esia_guidelines.pdf)
- [24] Commission européenne. 2001. European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (EIPPCB). Reference Document on Best Available Techniques (BREF) for Cement and Lime Production : <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>

- [25] Commission européenne. 2004. Directorate-General Joint Research Centre. Institute for Prospective Technological Studies (IPTS). Promoting Environmental Technologies: Sectoral Analyses, Barriers and Measures, Bruxelles.  
<http://www.jrc.es/>
- [26] MAXIME. P. "Récupération de la chaleur fatale : application aux fours rotatifs. Ingénierie de l'environnement". Ecole des Mines de Nantes, Thèse de Doctorat, 2015.
- [27] [http://www.febelcem.be/fileadmin/user\\_upload/rapport-environnemental/fr/](http://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/rapport-environnemental/fr/)
- [28] NICOLAS .B. "étude des caractéristiques physico-chimiques de nouveaux bétons éco-respectueux pour leur résistance à l'environnement dans le cadre du développement durable. Université de Strasbourg" Thèse de Doctorat ,2012.
- [29] CSI. 2005. CO<sub>2</sub> Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry. Cement CO<sub>2</sub> Protocol, July. Geneva: WBCSD.  
<http://www.wbcscement.org/climate.asp>
- [30] KHELIFA M. R. & al., "Les cimenteries et l'environnement cas de la cimenterie de ain-touta", *1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, SBEIDCO*. October 12-14 (2009) Oran-Algérie.
- [31] Commission Européenne (2010), "Document de référence sur les meilleures techniques disponibles Industries du ciment, de la chaux et de la magnésie", Ministère de l'énergie et du développement durable et de la mer en France, Paris.
- [32] DOUAIMI. Z. "Détermination de l'évaluation de la fiabilité des équipements industriels et leur optimisation par des diagnostics et des méthodes graphiques et numériques". Thèse de Master en génie mécanique, 2014.
- [33] Kadem. D.E.D. "Pollution des sols par les métaux lourds". Mémoire magistère, option Ecologie (2000). Université Mentouri Constantine - Algérie.
- [34] Commission européenne. 2001. European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (EIPPCB). Reference Document on Best Available Techniques (BREF) for Cement and Lime Production.  
<http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>
- [35] Cembureau (European Cement Association). 1999. Best Available Techniques for the Cement Industry. A contribution from the European Cement Industry to the Exchange of Information and Preparation of the IPPC BAT Reference for the Cement Industry. Bruxelles: Cembureau. <http://www.cembureau.be/>
- [36] CSI. Guidelines on the Responsible Use of Fuel and Materials. 2005:  
<http://www.wbcd.org/DocRoot/Vjft3qGjo1v6HREH7jM6/tf2-guidelines.pdf>
- [37] Natural Resources Canada (NRC). 2001. Office of Energy Efficiency. Energy Consumption Benchmark Guide: Cement Clinker Production.  
[http://oee.nrcan.gc.ca/publications/industrial/BenchmCement\\_e.pdf](http://oee.nrcan.gc.ca/publications/industrial/BenchmCement_e.pdf)
- [38] WORRELL E. et GALITSKY C. (2004), "Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making". An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley, University of California, Berkeley.  
[http://www.energystar.gov/ia/business/industry/Cement\\_Energy\\_Guide.pdf](http://www.energystar.gov/ia/business/industry/Cement_Energy_Guide.pdf)
- [39] Environment Canada. 2004. Foundation Report on the Cement Manufacturing Sector. Draft No. 1, Juin. Gatineau, Québec: Environment Canada.  
<http://www.ec.gc.ca/>

- [40] Wulf-Schnabel J., et Lohse J., (1999). "Economic Evaluation of Dust Abatement Techniques in the European Cement Industry". Okopol: Institute for Environmental Strategies.
- [41] IDDIR. K. "Processus de fabrication de ciment. groupe industriel des ciments d'Algérie", centre de formation de l'industrie du ciment « C.F.I.C ». Novembre 2012.
- [42] CHATIBI .A. "La société des ciments de Beni Saf (SCIBS)". Université Belhadj Bouchaib Ain Témouchent : Rapport de stage, 2016.
- [43] <http://www.infociments.fr/publications/ciments-betons/brochures/industrie-cimentiere-reduction-emissions-co2/>
- [44] CSI. 2005. Progress Report, Juin 2005. Genève: WBCSD.  
[http://www.wbcscement.org/pdf/csi\\_progress\\_report\\_2005.pdf](http://www.wbcscement.org/pdf/csi_progress_report_2005.pdf)
- [45] US EPA. United States (US) "Environmental Protection Agency (EPA), (1999). National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Source Categories, Part 63; Portland Cement Manufacturing Industry. Washington:  
<http://www.epa.gov/EPA-AIR/1999/June/Day-14/a12893.htm>
- [46] [21] LAIB M. & MEROUANI A., "Gestion et modes de traitement des différents types de déchets (gazeux, solide, liquide) générés par le processus de production dans la cimenterie de Hamma Bouziane", Mémoire de fin d'étude, Université de Constantine (2011).
- [47] Mohamed Kali - Beni Saf : La cimenterie continue à polluer – Journal El-Watan
- [48] GERARD GAY – Magazine Schneider Electric de l'enseignement technologique et professionnel.
- [49] LAGRAND – Réduire l'énergie réactive
- [50] 6<sup>ème</sup> rendez-vous de l'efficacité énergétique - Compensation d'énergie réactive.
- [51] Energie-Plus - Placer des condensateurs de compensation.
- [52] ECO-BOX – Fiche technique Energie active, réactive et apparente.
- [53] PATRICK ABATI – Compensation d'énergie réactive.
- [54] Les enjeux du développement durable au sein de l'industrie du ciment : réduction des émissions de CO<sub>2</sub>", Bulletin de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, Atelier changement climatique, 2006
- [55] SYNDICAT FRANCAIS DE L'INDUSTRIE CIMENTIERE - La valorisation des déchets en cimenterie, Préserver les ressources naturelles.
- [56] Energy Conservation Center, 1994. *Energy Conservation in Cement Industry – Output of a seminar*. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) and Ministry of International Trade and Industry, Sri Lanka, p. 44.  
<http://www.unido.org/userfiles/PuffK/cement.pdf>
- [57] JACOBS J.P. "Traitement des déchets industriels dans les fours à ciment ou les incinérateurs".
- [58] IGNISS ENERGY. "Technologie pour traitement de déchets dangereux-Incinérateur à four rotatif.
- [59] JACOBS J.P. - Préserver les ressources naturelles : la valorisation des déchets en cimenterie.
- [60] <http://hpmag.co.uk/news/fullstory.php/aid/1477/>

- [61] <http://lontra.co.uk/applications/cement/>
- [62] <https://www.gov.uk/government/case-studies/lontra-new-invention-cuts/>
- [63] <http://www.ingenia.org.uk/Content/ingenia/issues/issue65/>
- [64] <https://www.epo.org/news-issues/press/releases/archive/2017.html>
- [65] <https://www.epo.org/learning-events/european-inventor/finalists/2017.html>
- [66] <http://zenoot.com/articles/interview-steve-lindsey-ceo-of-lontra/>
- [67] <http://ici.radio-canada.ca/nouvelle/755815/corps-humain-capturer-co2-rechauffement-climatique>
- [68] *Rebouh .S. Impact de la pollution de l'air provoquée par la cimenterie TAHAR DJOUAD sur la santé publique et le cadre bâti – cas de HAMMA BOUZIANE.*



## Annexe A

### A.1 S'inspirer du corps humain pour capturer le CO<sub>2</sub> à grande échelle

#### A.1.1 introduction

Selon certains chercheurs, pour capturer le CO<sub>2</sub> à grande échelle il faut considérer des efforts pour réduire le réchauffement climatique. Comment y arriver sans créer d'autres problèmes?

Il existe une entreprise au Québec qui découvre une solution en basant sur une technique qui a les mêmes mécanismes trouvés dans le corps humain pour capturer le CO<sub>2</sub>. Dans les laboratoires de CO<sub>2</sub> Solutions à Québec, une douzaine de chercheurs travaillent à la mise au point d'une enzyme.

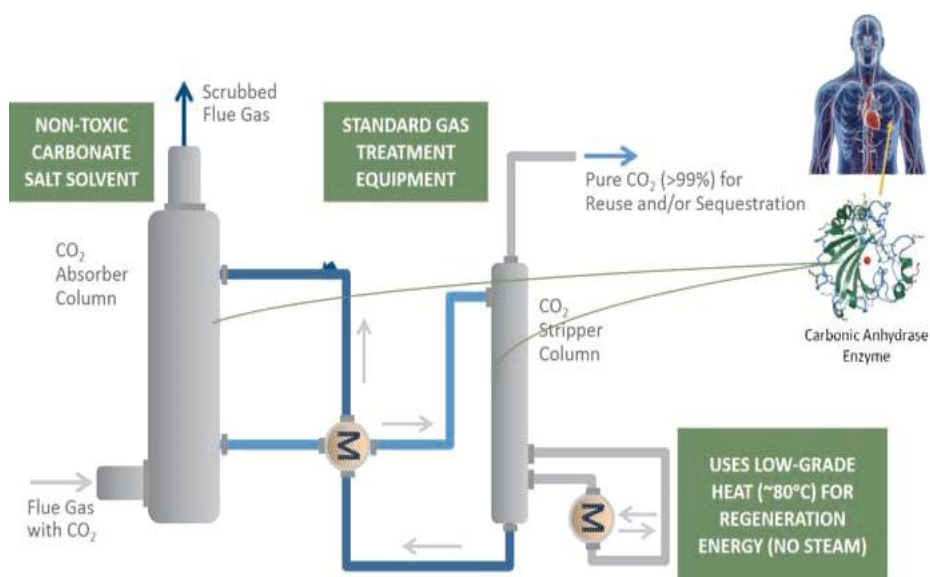
#### A.1.2. Principe de fonctionnement

Cet enzyme est fabriqué et développé particulièrement dans le laboratoire de CO<sub>2</sub> solutions à Québec.

C'est l'ingrédient à la base d'une nouvelle technique, que l'on dit plus verte, pour capturer le dioxyde de carbone qui s'échappe des cheminées d'usines. Cet enzyme est proche de celle qui est trouvé dans le corps humain qui a le rôle d'éliminé le reste de CO<sub>2</sub> dans le sang. L'enzyme est trouvé dans une fine poudre brune.

Tout ce que l'on fait, c'est de mettre cette poudre à l'intérieur d'un liquide. La combinaison fait que l'on peut retirer le CO<sub>2</sub> d'un gaz industriel.

Le liquide circule dans deux tours. On branche la cheminée de l'usine à la première tour. La fumée monte et entre en collision avec le liquide. C'est à ce moment que l'enzyme attrape le dioxyde de carbone. Dans la deuxième tour, on chauffe le liquide pour séparer le CO<sub>2</sub> qui est entreposé dans un réservoir [67].



**Fig. A.1.** Le processus de solutions de CO<sub>2</sub> pour la capture de CO<sub>2</sub> avec ses enzymes biologiques exclusives



**Fig. A.2.** Laboratoires de CO<sub>2</sub> Solution à Québec

Le pourcentage envisagé c'est 90 %, d'après des essais de cet enzyme pendant cinq mois, l'équipe de CO<sub>2</sub> solutions a réussi à capturer 10 tonnes de dioxyde de carbone par jour.

Le procédé consomme moins d'énergie et coûte de 30 % à 50 % moins cher que les méthodes de capture traditionnelles. Mais pour percer le marché, il faut toujours baisser les coûts, tout en capturant davantage de CO<sub>2</sub>. Il faut passer de 10 tonnes à plusieurs centaines, voire des milliers de tonnes par jour [67].

### **A.1.3. Les avantages de l'enzyme 1T1**

Au cours d'essais approfondis, la nouvelle enzyme, nommée 1T1, a démontré une longévité et une performance catalytique surpassant considérablement celles des meilleures enzymes provenant de tierces parties et utilisées par CO<sub>2</sub> Solutions jusqu'à présent. Ainsi, 1T1 devrait dorénavant être l'enzyme de choix pour le procédé de capture de carbone de la Société.

Le développement de 1T1 améliore davantage les performances et les avantages économiques déjà probants de cette technologie comparativement à d'autres technologies disponibles aujourd'hui.

Comparativement à ses pairs, 1T1 a une durée de vie plus longue dans le procédé de capture du CO<sub>2</sub> et offre une plus grande stabilité afin de répondre aux spécifications requises pour la capture efficace du CO<sub>2</sub>. Par la même occasion, les premiers résultats de fabrication suggèrent que le coût de production par unité de poids de cette enzyme est susceptible d'être considérablement inférieur à celui des enzymes, provenant de tiers, utilisées jusqu'à présent. Au niveau de concentration d'enzyme nécessaire pour offrir une capture de carbone optimale, CO<sub>2</sub> Solutions estime que ceci devrait résulter en une réduction importante des coûts liés à l'enzyme, entraînant ainsi une réduction supplémentaire des frais d'exploitation du procédé de capture.

La Société a confié en sous-traitance la production de 1T1 à un tiers, et des lots à l'échelle industrielle ont été fabriqués. Avec 1T1, CO<sub>2</sub> Solutions pourra confier la production de l'enzyme à un certain nombre de sous-traitants potentiels, tout en contrôlant la propriété intellectuelle connexe.

Cette technologie est construite autour de l'utilisation du puissant catalyseur enzymatique, l'anhydrase carbonique (CA), qui gère efficacement le dioxyde de carbone pendant la respiration chez les humains et tous les autres organismes vivants. En utilisant une solution d'eau salée semblable à celle de l'eau de mer associée à l'enzyme, le résultat est un «poumon industriel» pour la capture du carbone avec des coûts d'exploitation et d'investissement peu élevés en utilisant une infrastructure de matériel connue qui est également favorable à l'environnement.

### **A.1.4. Une fois le CO<sub>2</sub> capturé, comment s'en débarrasser ?**

Il y a toute une industrie qui regarde le CO<sub>2</sub>, non pas comme un déchet, mais comme une ressource que l'on peut réutiliser

Le CO<sub>2</sub> capturé est utilisable pour la fabrication de boissons gazeuses ou dans les serres.

Par exemple dans les serres, nous sommes besoin de brûler du gaz naturel ou du propane pour avoir le gaz carbonique essentiel pour la croissance des plantes.

Comme grand exemple on a les cimenteries (cas de la cimenterie de Béni Saf ) qui est joue un rôle principal des émissions qui proviennent du domaine de la construction. Les cimenteries émis des milliers de tonnes de CO<sub>2</sub> par jour. Des tonnes de gaz qu'on peut capturer pour l'ajouter dans le béton.

« En ce faisant, on vient renforcer le béton et séquestrer le CO<sub>2</sub> », dit le président de l'entreprise CO<sub>2</sub> solutions [67].

Par exemple, en combinant le CO<sub>2</sub> capturé avec l'hydrogène produit à partir de sources renouvelables, le CO<sub>2</sub> peut être transformé en carburants à faible teneur en carbone, en produits chimiques et en matières plastiques, et même en protéines. Avec un investissement de 15 millions de dollars du Fonds vert.

Les mesures d'atténuation qui peuvent réduire de manière significative le changement climatique entraînant des émissions de CO<sub>2</sub> tout en n'endommageant pas une économie qui dépend encore largement des combustibles fossiles.

la capture du carbone est positionnée comme un outil de changement climatique viable et aide l'industrie à concurrencer avec succès dans un monde de plus en plus contraint par le carbone en réduisant les émissions et en produisant de nouveaux produits «verts» à partir de ces émissions.

Le projet pilote de 10 tonnes par jour en partenariat avec Husky Energy a confirmé le potentiel d'un coût de capture de CO<sub>2</sub> à grande échelle inférieur à 40 dollars par tonne

#### **A.1.5. Conclusion**

La technique d'enzyme pour capturer le CO<sub>2</sub> est proche de celle qui est trouvée dans le corps humain qui a le rôle d'éliminer le reste de CO<sub>2</sub> dans le sang. .

Étant donné que cette méthode est efficace dans le corps des organismes vivants et donc efficace lorsqu'elle est appliquée dans les usines car elle est considérée comme un poumon industriel contribue à réduire la proportion de dioxyde de carbone émis par les usines spécialement les cimenteries comme la cimenterie de Béni Saf qui considère comme grand responsable des émissions de CO<sub>2</sub> qui menace l'environnement et la population.