



Université Sidi Mohammed Ben Abdellah

Faculté des Sciences et Techniques

[www.fst-usmba.ac.ma](http://www.fst-usmba.ac.ma)



Année Universitaire : 2014-2015

**Master Sciences et Techniques GMP**  
**Génie des Matériaux et des Procédés**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

**Contribution à l'amélioration de l'efficacité  
énergétique de l'atelier de broyage BK1**

Présenté par:

**RAHMANI Maryem**

Encadré par:

- LOUZA Abderrahmane (Parrain « Asment TEMARA »)-  
ASSOUIK Jamal (FST Fès)

Soutenu Le 25 Juin 2015 devant le jury composé de:

- Pr. M. CHAOUQI                      FSTF
- Pr. H. ZAITAN                        FSTF
- Pr. J. ASSOUIK                       FSTF

Stage effectué à : La cimenterie « Asment TEMARA »



# **Dédicace**

## ***A ma très chère mère***

*Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.*

*Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.*

*Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.*

*Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.*

*Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.*

## ***A la mémoire de mon très cher père***

*Je dédie cet événement marquant de ma vie à la mémoire de mon père disparu trop tôt. J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'un fils qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde !*

## ***A mon très cher frère Zakaria***

## ***A ma famille et à tous mes amis***

## ***A tous ceux qui me sont chers,***

*Je vous dédie en signe de reconnaissance et de dévouement cet humble travail qui n'aura pas vu jour sans vos soutiens et vos collaboration*

## Remerciements

En préambule à ce mémoire, je souhaitais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce projet.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur Jamal ASOUIK, professeur du département Génie des Procédés et matériaux de la faculté des sciences et techniques FES, pour son encadrement, ses conseils, son soutien, et le temps qu'il a bien voulu me consacrer malgré ses charges académiques et professionnelles ;

Je tiens à exprimer mon profond remerciement et ma grande gratitude à M. Abderrahmane LOUZA, chef de service procédés et mon parrain industriel qui, en dépit de sa charge et de ses responsabilités, n'a épargné aucun effort pour me faire part de ses connaissances et de ses précieux conseils et de ses directives ;

Mes remerciements s'adressent également à M. Najib HAMRIA, chef du service laboratoire au sein d'Asment TEMARA, pour sa disponibilité, son aide précieuse et sa grande patience ;

Mes vifs remerciements et gratitude vont aussi à tout le personnel d'ASMENT TEMARA, en particulier, celui des services procédés et laboratoire, pour leur collaboration et leur disponibilité.

Mes sincères remerciements au membre de jury :

Pr. Mohammed CHAOUQI

Pr. Hicham ZAITAN

## Liste des tableaux

Tableau 1: les minéraux principaux du ciment .....	6
Tableau 2: pourcentages des constituants pour chaque type de ciment .....	9
Tableau 3: données technique du séparateur dynamique .....	19
Tableau 4: données techniques du filtre à manche du séparateur et du broyeur .....	20
Tableau 5: distribution de la période d'audit .....	22
Tableau 6: Conditions atmosphériques pendant l'étude .....	23
Tableau 7: objectives qualités pour CPJ 35 .....	23
Tableau 8: les mesures aérauliques dans les points de mesure .....	24
Tableau 9: le débit d'air faux dans le circuit de broyage.....	25
Tableau 10: La différence de pression des équipements du circuit de broyage avec leurs limites acceptables.....	25
Tableau 11 : Refus et surface spécifique du ciment produit .....	26
Tableau 12 : Distribution de la taille granulométrique de l'alimentation.....	27
Tableau 13 : la résistance du ciment produit CPJ35 en (2/7/28 jours).....	27
Tableau 14: Bilan massique d'entrée.....	28
Tableau 15: Bilan massique de sortie .....	28
Tableau 16: Température des matières dans le circuit de broyage .....	29
Tableau 17: Bilan thermique à l'entrée broyeur .....	29
Tableau 18: Bilan thermique de la sortie broyeur .....	30
Tableau 19: Consommation électrique des équipements de l'atelier de broyage.....	31
Tableau 20: Charge des boulets 1ère chambre.....	34
Tableau 21: charge des boulets dans la 2ème chambre .....	35
Tableau 22 : Les paramètres de marche caractérisant la charge aéraulique et massique du séparateur dynamique .....	37
Tableau 23: la charge des boulets proposés pour la 1 <sup>ère</sup> chambre .....	39
Tableau 24: la charge des boulets proposés pour la 2 <sup>ème</sup> chambre .....	40
Tableau 25: Résultats des essais mécanique de l'adjuvant M.....	47
Tableau 26: Résultats des essais mécanique de l'adjuvant G.....	48
Tableau 27: Résultats des essais mécaniques par rapport au débit optimal des deux adjuvants .....	49
Tableau 28: Résultats des résistances sans et avec adjuvant M.....	50

<b>Tableau 29: Essais industriels de l'adjuvant M.....</b>	<b>51</b>
<b>Tableau 30: Gain porté par la réduction du clinker .....</b>	<b>52</b>
<b>Tableau 31 : fiche de calcul du bilan aéraulique .....</b>	<b>59</b>
<b>Tableau 32 : la production du broyeur ciment BK1 .....</b>	<b>60</b>
<b>Tableau 33 : Alimentation du broyeur – analyses pour différentes mailles .....</b>	<b>61</b>

## Liste des figures

Figure 1: Les différents constituants entrant dans la fabrication du ciment Portland .....	5
Figure 2: Schéma de procédé de fabrication du ciment.....	9
Figure 3: schéma représentative du circuit fermé de l'atelier de broyage ciment .....	12
Figure 4: les composants d'un doseur .....	12
Figure 5: Schéma descriptive d'un broyeur à ciment a deux compartiments .....	13
Figure 6: Type de blindage dans la première et la deuxième chambre.....	14
Figure 7: zone morte dans le broyeur.....	14
Figure 8: Constituants de cloison .....	14
Figure 9 : distribution de la charge broyante le long du broyeur.....	15
Figure 10 : Le mode de broyage.....	16
Figure 11 : les différents flux entrant et sortant du séparateur dynamique de 3 <sup>ème</sup> génération.....	17
Figure 12: les constituants du filtre à manches .....	20
Figure 13 : Shéma montrant les différents points de mesure .....	22
Figure 14 : image de la gaine d'entrée broyeur .....	31
Figure 15 : image montrant l'état de la plaque de blindage de la première chambre .....	32
Figure 16 : image de l'état du diaphragme intermédiaire .....	32
Figure 17 : vue transversale du côté de l'entrée et vue longitudinale de BK1.....	33
Figure 18 : à gauche : image de la ferraille dans les lumières du diaphragme intermédiaire .....	33
A droite : image du diaphragme de décharge indiquant la plaque qui manque .....	33
Figure 19: image de l'état du blindage de la deuxième chambre.....	33
Figure 20 : à gauche : image de la charge à l'intérieur de la deuxième chambre .....	34
A droite : vue transversale du côté de sortie et vue longitudinale de BK1 .....	34
Figure 21 : profil de la matière et des boulets à l'intérieur du broyeur .....	36
Figure 22 : Effet de l'adjuvant sur les boulets.....	50
Figure 23 : image de tube de Pitot utilisé dans la mesure de la pression dynamique de l'air .....	56

<b>Figure 24 : image de l'appareil anémomètre .....</b>	<b>58</b>
<b>Figure 25 : A gauche : Exemple de passant et de rejets, à droite: la colonne de tamis.....</b>	<b>61</b>
<b>Figure 26: spectre de fluorescence X .....</b>	<b>66</b>

## Symboles

K	Clinker ;
CPJ	Ciment Portland avec ajouts ;
C <sub>2</sub> S	(CaO) <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub> ;
C <sub>3</sub> S	(CaO) <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub> ;
R28j	Résistance à la compression de 28 jours ;
R2j	Résistance à la compression de 2 jours ;
R7j	Résistance à la compression de 7 jours ;
R <sub>x</sub>	Refus à la maille x en % ;
SSB	Surface spécifique de Blaine en cm <sup>2</sup> /g ;
Tr	Température de référence en °C ;
Wi	Broyabilité de la matière en KWh/t ;
τ <sub>i</sub>	Degré de remplissage de la chambre i du broyeur en % ;
BK1	Atelier de broyage ciment 1 ;
C1	Première chambre ;
C2	Deuxième chambre ;
PF	La perte au feu ;
C.C.	La charge circulante ;
d <sub>75</sub>	75% de la matière qui passe dans la maille de diamètre d ;
d <sub>25</sub>	25% de la matière qui passe dans la maille de diamètre d ;
d <sub>50</sub>	50% de la matière qui passe dans la maille de diamètre d ;
R <sub>80 μm</sub>	Refus au tamis 80 μm ;
H <sub>i</sub>	La hauteur de vide dans la chambre i du broyeur en m ;
SO <sub>3</sub>	Trioxyde de soufre ;
CaO libre	la chaux libre ;



# Sommaire

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA SOCIETE .....</b>	<b>3</b>
<b>I. Présentation générale de la société Asment TEMARA .....</b>	<b>4</b>
<b>I-1. Groupe VOTORANTIM .....</b>	<b>4</b>
<b>I-2. ASMENT TEMARA .....</b>	<b>4</b>
<b>II. Généralités sur l'industrie cimentière .....</b>	<b>5</b>
<b>III. Description du procédé de fabrication de ciment .....</b>	<b>6</b>
III-1-1 Production clinker .....	6
II-2-1-1 Exploitation de la carrière .....	6
II-2-1-2 Concassage des matières premières .....	6
II-1-2-3 La pré-homogénéisation .....	7
II-1-2-4 Atelier broyage de la matière cru .....	7
II-1-2-5 Homogénéisation .....	7
II-1-2-6 La ligne de cuisson .....	8
III-1-2 Broyage ciment et expédition .....	8
II-2-2-1 Broyage ciment .....	8
II-2-2-2 Ensachage et expédition .....	9
<b>CHAPITRE II : PROCEDE DE BROYAGE CIMENT .....</b>	<b>10</b>
<b>II. Présentation de l'Atelier de broyage ciment 1 .....</b>	<b>12</b>
<b>II-1. Les équipements de l'atelier BK1 .....</b>	<b>12</b>
<b>CHAPITRE III : AUDIT ENERGETIQUE DE L'ATELIER DE BROYAGE BK 1 .....</b>	<b>21</b>
<b>I. Démarche de l'audit .....</b>	<b>22</b>
<b>II. Résultats et interprétations .....</b>	<b>23</b>
<b>II-1. Conditions d'établissement de l'audit .....</b>	<b>23</b>
<b>II-2. Bilan aéraulique .....</b>	<b>24</b>
<b>II-3. Bilan massique .....</b>	<b>26</b>
<b>II-4. Bilan énergétique .....</b>	<b>29</b>
<b>II-5. Equipement majeurs .....</b>	<b>31</b>
II-5-1 Broyeur .....	31
II-5-2 Séparateur .....	37
<b>III. OBSERVATIONS ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>38</b>
<b>III-1. Production et consommation d'énergie .....</b>	<b>38</b>

III-2. L'erreur des doseurs .....	38
III-3. Les vitesses de broyeur .....	38
III-4. Le Profil de la charge des boulets et l'évolution granulométrique à l'intérieur du broyeur .....	39
III-5. Le Séparateur dynamique .....	41
III-6. Inspection interne du broyeur .....	41
III-7. Entrées air faux .....	42
IV. Calcul économique des gains provenant de l'élimination des défaillances de l'atelier le broyage ciment BK1 .....	42
<b>CHAPITRE IV ETUDE D'AMELIORATION DU RATIO C/K DE L'ATELIER DE BROYAGE PAR AJOUT D'AGENTS DE MOUTURE.....</b>	
I- Agent de mouture.....	45
I-1. Définition et fonction: .....	45
II. Mode opératoire.....	46
III. Expression des résultats des essais laboratoires .....	47
IV. Essais industriels de l'adjuvant M.....	50
VIII. Evaluation économique.....	52
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>54</b>

# Introduction générale

Maximisation de la production, optimisation et amélioration de la régularité et de la qualité des produits, réduction des consommations énergétiques, contrôle des coûts de maintenance : autant d'enjeux auxquels doit faire face une industrie dynamique, performante et compétitive. Et ce n'est pas celle du ciment qui fera l'exception, surtout que le secteur connaît de profondes mutations au Maroc avec pour objectifs une réduction des coûts structurels, et des coûts de consommation énergétiques.

D'autre part, l'économie de marché mondiale astreint les industriels à rester toujours plus compétitifs pour la survie de leurs activités. Ceci implique en partie de développer des moyens de production performants et économiquement fiables <sup>[1]</sup>.

Les différentes étapes de procédé de fabrication du ciment sont très énergivores, en particulier le broyage du clinker qui présente **40% de l'énergie totale consommée**. Ainsi, ASMENT TEMARA qui détient 8% du marché national vise à identifier les gisements d'économie d'énergie pour réduire sa facture énergétique, principale composante du prix de revient. Pour se faire, l'entreprise veille à une meilleure maîtrise de son processus de fabrication et à la mise en œuvre de nouveaux procédés.

C'est dans cette optique là qu'Asment TEMARA a exprimé son besoin d'améliorer la production de l'atelier de broyage ciment BK1. On a donc abordé, dans le cadre de ce stage, les différents aspects de cet atelier à savoir le fonctionnement des installations conçues pour le broyage du clinker et le circuit emprunté par celui-ci, ainsi que les différentes procédures mises en place par Asment TEMARA afin d'améliorer la production ainsi que l'efficacité énergétique de l'atelier.

C'est dans cette optique que s'inscrit le présent projet de fin d'étude qui porte sur l'amélioration de l'efficacité énergétique de l'atelier de broyage ciment 1et ce, via l'audit énergétique et la gestion d'énergie des trois ateliers.

Il sera donc question, dans un premier temps, d'introduire le contexte général du projet, en passant par l'étude bibliographique du ciment, avant d'aboutir à la description du procédé de fabrication du ciment.

Ensuite, en vue de comprendre les aspects du processus du broyage du ciment, nous avons consacré le deuxième chapitre à la description du procédé de broyage où on passera en revue les différentes caractéristiques d'un atelier de broyage ciment et les paramètres influençant la dynamique de la matière et l'efficacité des opérations du broyage et de la classification. Ensuite on donnera un

aperçu de l'atelier objet de l'étude ainsi que les différents standards de la bonne marche des différents équipements.

# **CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA SOCIETE**

# I. Présentation générale de la société Asment TEMARA

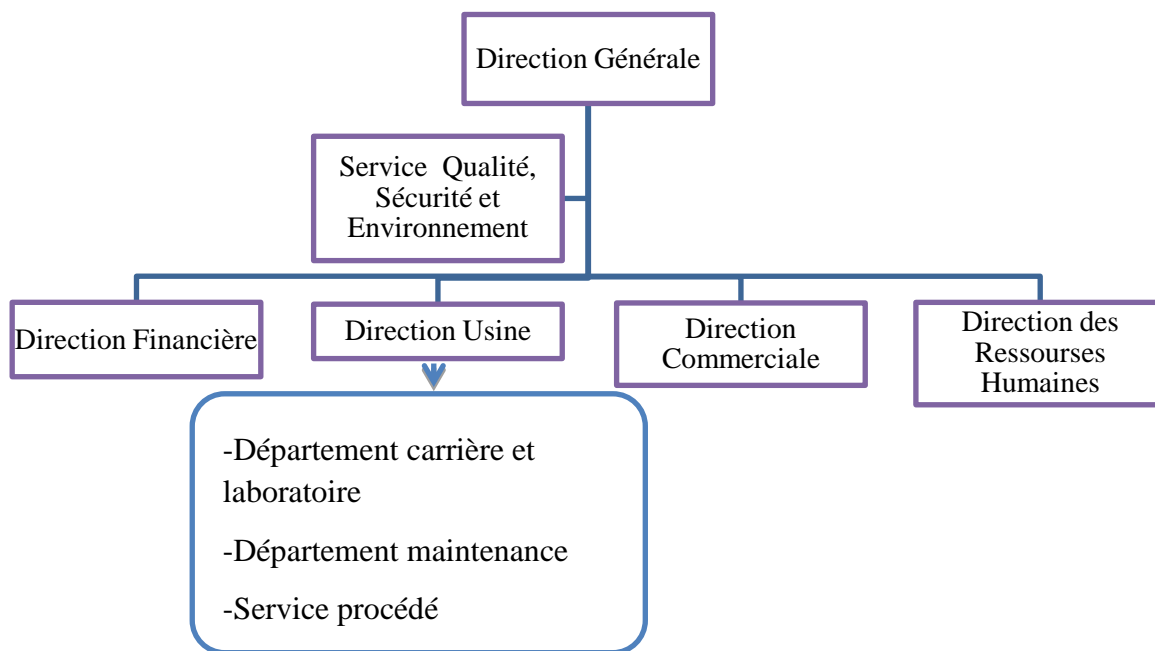
## I-1. Groupe VOTORANTIM

**Votorantim Cimentos**, fondée en 1936, est l'un des dix plus grands producteurs de ciment dans le monde et est le leader du marché dans l'industrie du ciment au Brésil. Leur portefeuille d'activités se compose de quatre grandes lignes de produits: Ciment, granulats, béton et les produits complémentaires.

## I-2. ASMENT TEMARA

Située à 15 Km au sud de Rabat et fondée en 1976, ASMENT TEMARA est une société anonyme, filiale du groupe brésilien VOTORANTIM, appartenait au groupe Laraqui auparavant.

ASMENT TEMARA a pour activité la production et la commercialisation de trois qualités du ciment (CPJ35, CPJ45 et CPJ55) granulats et ciments prêt à l'emploi.



**Organigramme 1: structure administrative d'Asment TEMARA**

### ❖ Historique Asment Temara

**1995:** Certification des produits CPJ 35 et CPJ 45 d'ASMENT TEMARA. Remise des certificats de conformité à NM, par le Ministre de l'Industrie, Monsieur DRISS JETTOU.

**1996:** Le Groupe Laraqui cède 54% du capital à CIMPOR, qui prend ainsi le contrôle d'ASMENT TEMARA.

**1997:** Signature avec le Ministère de l'Environnement de l'Engagement de (APC) à se conformer librement à une Charte Environnementale Citoyenne.

**1998 :** La Création de la filiale « BETOCIM », Société spécialisée dans la fabrication et la commercialisation du Béton Prêt à l'Emploi avec l'ouverture d'une 1ère Centrale à Salé.

**2001 :**Obtention du label de Certification Qualité ISO 9002-1994.

**2003 :**Lancement de la 2ème phase d'extension de l'usine pour parachever le doublement de la capacité de production initiale. Elaboration et démarrage d'un plan de réhabilitation environnementale des carrières d'ASMENT TEMARA. ASMENT TEMARA obtient le Certificat de Qualité ISO 9001 version 2000.

**2005 :**Les nouvelles installations opérationnelles de l'usine sont officiellement inaugurées. La capacité de production annuelle de l'usine passe à 1,2 Millions de tonnes.

Obtention du label de Certification environnementale ISO 14001 version 2004.

**2012 :** l'acquisition d'ASMENT TEMARA par le groupe Brésilien VOTORANTIM dans le cadre de l'achat des actions de CIMPOR.

## II. L'industrie cimentière

### II-1. Généralités sur le ciment

#### II-1-1 Définition de ciment

Le ciment est une poudre minérale fine obtenue au terme d'un processus de fabrication très précis. C'est un liant hydraulique mélangée à de l'eau, forme une pâte qui se fige et durcit, même sous l'eau. Selon la composition et la finesse de la poudre, les propriétés du ciment ne sont pas les mêmes. Le ciment est le principal composant du béton, auquel il confère un certain nombre de propriétés, et notamment sa résistance <sup>[2]</sup>.



**Figure 1: Les différents constituants entrant dans la fabrication du ciment Portland**

Minéralogiquement parlant, le ciment est fait essentiellement à partir de quatre constituants :

**Tableau 1: les minéraux principaux du ciment**

Nom	Symbole chimique	Symbole cimentier	Masse molaire
Oxyde de Calcium	CaO	C	56
Oxyde de silice	SiO <sub>2</sub>	S	60
Oxyde d'Aluminium	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	102
Oxyde de Fer	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	160

Ces quatre éléments de base ne se trouvent pas dans la nature dans des états adéquats favorisant l'émergence des liants hydrauliques. En effet, la chaux CaO se carbonate facilement en absorbant le gaz carbonique de l'air, pour devenir de la roche calcaire, en abondance dans nature. Les trois oxydes (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) abondent dans la nature sous forme cristallisée et stable (sable, argiles, etc.)

La composition de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium, résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec de la silice (SiO<sub>2</sub>), de l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), et de l'oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La chaux nécessaire est fournie par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles.

### **III. Description du procédé de fabrication de ciment**

#### **III-1-1 Production clinker**

##### **II-2-1-1 Exploitation de la carrière**

Elle consiste à extraire les matières premières (argile, calcaire et latérite principalement) à partir de carrières naturelles à ciel ouvert sur un front d'une hauteur de 12 à 16 mètres. Ces matières premières sont extraites des parois rocheuses par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique.

##### **II-2-1-2 Concassage des matières premières**

La granulométrie des matériaux extraits de la carrière est très variable. Pour faciliter le mélange dans les proportions fixées par le laboratoire, il faut réduire la granulométrie pour obtenir un produit inférieur à 50 mm. Les matériaux repris en carrière par les camions sont amenés aux concasseurs.

ASMENT TEMARA dispose de deux types de concasseurs:

- Concasseur primaire à mâchoire : la granulométrie est réduite à des dimensions inférieures à 300 mm.



- Concasseur secondaire à marteaux pour réduire les dimensions à moins de 50mm.

La matière concassée est envoyée vers l'usine via des convoyeurs à bandes et est versée dans un hangar dit de pré-homogénéisation ou hall de préparation de tas.

### **II-1-2-3 La pré-homogénéisation**

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.

### **II-1-2-4 Atelier broyage de la matière cru**

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 d'autant plus intenses lors de la cuisson que les surfaces de contact entre les grains de matière et les gaz sont importantes.

Le laboratoire de contrôle de l'usine, qui connaît la composition optimale des divers constituants premiers, fixe les proportions de correction à fin de s'approcher de la composition cherchée. La correction se fait par le biais de quatre doseurs placés en amont du broyeur :

- Doseur de tout venant, qui alimente le broyeur par la matière qui arrive du pré-homogénéisation.
- Doseur du calcaire riche pour la correction du pourcentage de la chaux.
- Doseur du schiste réglant le pourcentage en silice et en alumine.
- Doseur de pyrrhotine contrôlant la teneur en fer.

### **II-1-2-5 Homogénéisation**

Pour obtenir un cru le plus homogène possible, c'est à dire dans toutes les caractéristiques (composition chimique, granulométrie...) qui doivent présenter le minimum de variations, il faut parfaire le travail commencé avec la pré-homogénéisation.

La matière broyée est stockée dans des silos dits d'homogénéisation qui sont équipés d'un réseau d'insufflation d'air sec sur deux étages. Cet air permet le mélangeage de la matière et empêche l'agglomération des particules. Il y a aussi un canal à l'extérieur du silo qui sert à déplacer la farine du bas vers le haut à l'aide d'un ventilateur pour obtenir l'homogénéisation totale.

## **II-1-2-6 La ligne de cuisson**

### **a. La tour de préchauffage**

C'est une tour de préchauffage de la farine où les particules sont chauffées en suspension dans un flux de gaz chaud, constituée de 4 cyclones et d'un pré-calciateur. Elle a pour rôle la récupération de l'énergie calorifique emportée par les gaz chauds de la cuisson. Ces gaz permettent de sécher la farine crue et sa calcination jusqu'à 90% avant son introduction dans le four, l'échange entre l'air et la matière se fait à contre-courant.

### **b. Le four rotatif**

Il s'agit d'un cylindre creux légèrement incliné et revêtu intérieurement de brique réfractaire. Le déplacement de la matière dans le four est assuré par la rotation et l'inclinaison de celui-ci.

Le four peut être réparti en deux zones principales :

- ✓ Zone de décarbonatation où la calcination de la matière est achevée ;
- ✓ Zone de clinkérisation où le  $C_2S$  est combiné avec  $CaCO_3$  pour donner le  $C_3S$  qui, une fois refroidi, donne les nodules de clinker.

### **c. Le refroidissement**

Le refroidisseur à clinker fait partie de la ligne cuisson. Il a une influence déterminante sur les performances et l'économie de l'installation.

Sa fonction est double:

- Récupérer le maximum de chaleur dans le clinker chaud (1 450°C) pour la recycler dans le procédé;
- Abaisser la T°C du clinker à un niveau compatible avec le bon fonctionnement des équipements.

## **III-1-2 Broyage ciment et expédition**

### **II-2-2-1 Broyage ciment**

Pour développer les propriétés hydrauliques et rhéologiques du ciment, le clinker est broyé en y ajoutant le gypse, le calcaire et les cendres volantes selon le type du ciment produit. Le gypse est un régulateur de temps de prise, le calcaire et les cendres volantes sont des additifs d'amélioration de la résistance du produit.

ASMENT TEMARA comprend trois broyeurs à boulets (BK1, BK2 et BK3). Le procédé de broyage ciment sera détaillé dans le chapitre qui suit.

## II-2-2-2 Ensachage et expédition

Le produit fini est acheminé vers les cinq silos de stockage par des aérogliisseurs et des élévateurs à godets. Le ciment est ensuite livré soit en vrac, soit par sac.

La mise en sac se déroule à l'aide de machines automatiques de remplissage et de passage. Tandis que la livraison en vrac du ciment s'effectue par la mise en fluidisation de la poudre et propulsion par pompe aux aérogliisseurs<sup>3</sup>.

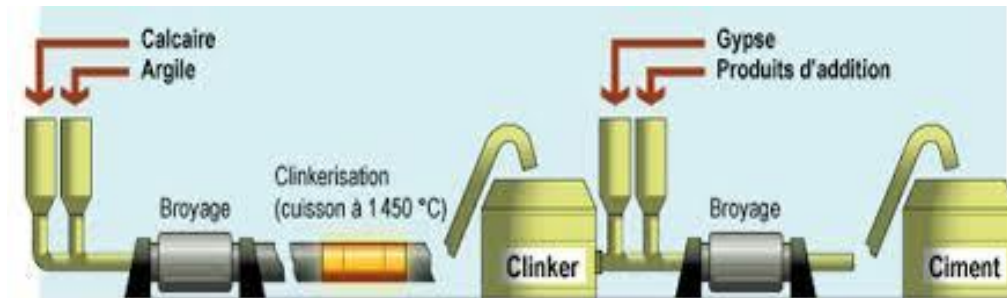


Figure 2:Schéma de procédé de fabrication du ciment

Asment Temara produit les catégories de ciment suivant : CPJ 35, CPJ 45 et CPJ5.

Tableau 2: pourcentages des constituants pour chaque type de ciment

	<b>CLINKER</b>	<b>CALCAIRE</b>	<b>GYPSE</b>	<b>CENDRES VOLANTES</b>
<b>CPJ 35</b>	63.23%	26.20 %	4.67 %	4.58%
<b>CPJ 45</b>	72.5%	19 %	3.5 %	5 %
<b>CPJ 55</b>	83.5%	13.5 %	3 %	0%

# **CHAPITRE II : PROCEDE DE BROYAGE CIMENT**

## **Introduction**

Dans cette partie, nous allons présenter le procédé de fabrication du ciment où nous passerons en revue les principales caractéristiques des différents équipements constituant l'atelier BK1.

### **I. Définition du broyage**

Le broyage est une opération de comminution qui consiste à fragmenter un matériau afin de développer des propriétés physico-chimiques liées à la qualité du produit fini. C'est un procédé prédominant en industrie cimentière, car il intervient dans la préparation de la farine, du combustible et dans l'élaboration du ciment.

- **Principe - procédé**

On peut classer le broyage en trois grandes familles de fonctions: le broyage grossier ou concassage, le broyage fin et le broyage ultrafin.

- Le broyage grossier: On parle de solides de grandes tailles pour obtenir des éléments de dimensions de l'ordre du cm.
- Le broyage fin: Cette catégorie donne des particules de dimensions entre 1cm et 0.1cm.
- Le broyage ultrafin: Le diamètre moyen des particules est de 100 à 10µm et peut descendre jusqu'à 1µm. Le mode de broyage est principalement par attrition, c'est à dire abrasion des grains sur eux-mêmes et/ou sur les organes métalliques du broyeur <sup>[4]</sup>.

- **Avantages du procédé**

- Le broyage augmente la surface d'échange entre le solide pulvérulent et le milieu extérieur (gaz);
- Il permet de faciliter le mélange avec un autre solide;
- Il augmente les transferts dans des opérations de séchage, refroidissement, extraction, etc.

- **Inconvénients du procédé**

- Le broyage est une opération consommatrice d'énergie ;
- La maintenance des appareils est coûteuse ;
- Les investissements sont lourds.

Les broyeurs peuvent être utilisés en circuit ouvert ou en circuit fermé. Dans notre cas, l'utilisation des broyeurs en circuit fermé, elle a pour but de maîtriser la finesse du produit fini d'une part, et de réduire la consommation énergétique d'autre part.

Dans ce type de circuit, qui est procédé par Asment TEMARA, le matériau d'alimentation, lorsqu'il sort du broyeur est entraîné jusqu'au séparateur de particules (statique, dynamique). Ainsi, le matériau est soumis au processus de séparation sélective des particules dont la fraction grosse retourne dans le broyeur et dont la fraction fine qui est le produit fini part vers l'étape qui suit. Cette configuration présente les avantages suivants :

- L'ajustement de la finesse du produit fini sans changer la distribution de la charge broyante ;
- La réduction du temps de séjour par rapport à celui du circuit ouvert;
- Adaptation au flux important de ventilation ;
- Diminution du risque d'enrobage et d'agglomération des fines.

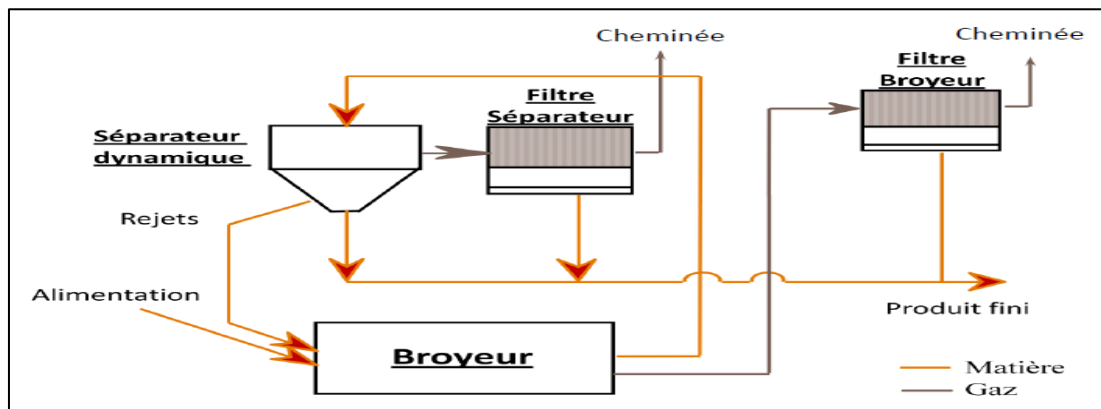


Figure 3:schéma représentative du circuit fermé de l'atelier de broyage ciment

## II. Présentation de l'Atelier de broyage ciment1

### II-1. Les équipements de l'atelier BK1

#### -Les trémies

Réservoir en forme de pyramide renversée permettant le stockage et le déstockage des matériaux.

#### -Les doseurs à bande peseuse

Le dispositif de commande mesure et compare, en continu, le poids réel avec le poids de consigne, et ajuste automatiquement le régime du moteur, soit pour augmenter, soit pour réduire la vitesse de la bande, afin de maintenir un débit constant.

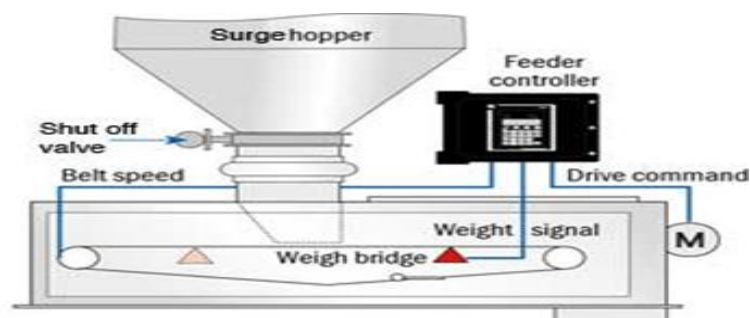
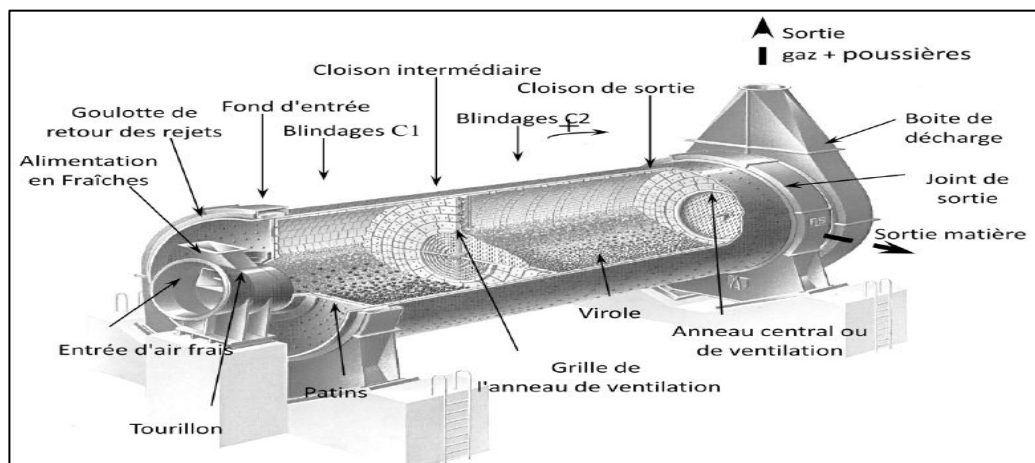


Figure 4:les composants d'un doseur

## -Broyeur à boulets

- **Description du broyeur à boulets**

C'est un tube cylindrique horizontal rotatif et dont l'intérieur est revêtu de pièces d'un matériau à dureté élevée qui résiste à l'impact et à l'abrasion appelées blindage. Il est divisé en deux compartiments de broyage par une paroi intermédiaire dénommée diaphragme de qui permet le passage du produit à broyer. De même conception que la précédente, la paroi de sortie permet l'évacuation du produit broyé. La première chambre, chargée de boulets de grand diamètre (entre 90 et 60 mm), réalise un concassage par choc entre boulets afin d'éliminer les plus gros grains revêtu d'un blindage releveur qui soulève et laisse rouler les corps broyants sur le matériau. La deuxième chambre est plus longue, réalise un broyage plus fin grâce à des boulets de taille plus petite (entre 50 et 17mm), elle est revêtu d'un blindage classant.



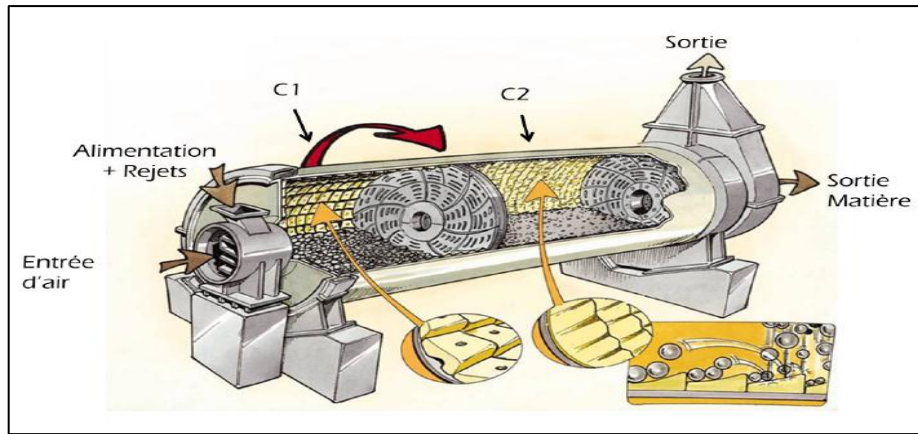
**Figure 5:Schéma descriptive d'un broyeur à ciment a deux compartiments**

L'atelier de broyage BK1 possède un broyeur à boulets horizontal avec deux chambres de broyage, une dimension égale à  $\varnothing 3,80 * 13,65$  m et une puissance motrice du broyeur 2944 KW. La capacité nominale de broyage en base sèche de 115 t/h.

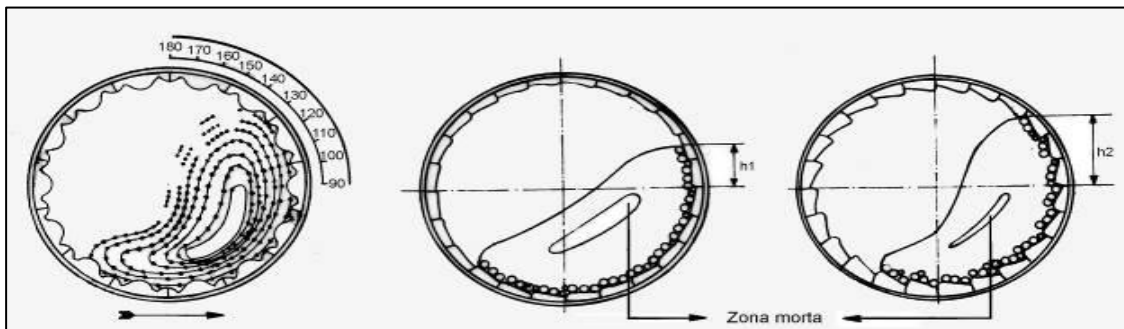
### a) Composants internes du broyeur à ciment

#### ➤ Plaques de blindage

La virole du broyeur est protégée par des plaques de revêtement ou blindage résistant aux forces d'impact causées par l'élévation continue des corps broyants ainsi que par l'usure causée par l'usure causée par attrition entre les corps broyants, le matériau et les plaques. L'utilisation d'un blindage inadéquat engendre la réduction du pouvoir élévateur et classant de la charge, l'augmentation de la zone morte dans le broyeur et le glissement des corps broyants pour une **zone morte** minimisée.



**Figure 6: Type de blindage dans la première et la deuxième chambre**

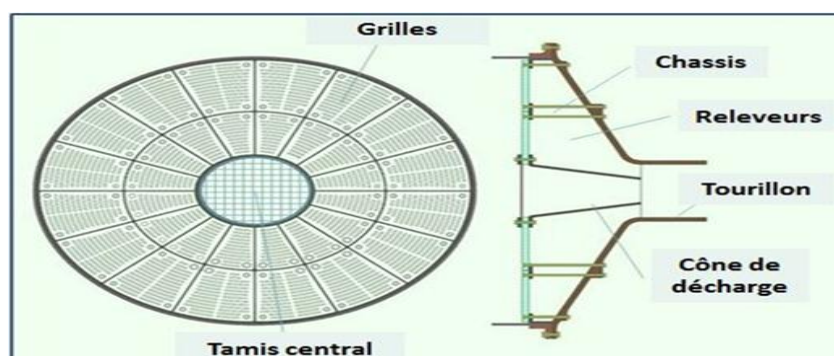


**Figure 7: zone morte dans le broyeur**

### ➤ Diaphragme ou cloison de séparation

La cloison est une plaque métallique séparant les deux compartiments du broyeur. Elle est constituée d'une structure segmentée dont la partie centrale possède une zone de section libre suffisante pour le passage de l'air de ventilation, elle assure les fonctions suivantes :

- ✓ Retenir la charge broyante dans les compartiments respectifs de broyage;
- ✓ Réguler le flux, le niveau et le temps de séjour du matériau dans les compartiments ;
- ✓ Transférer le matériau d'un compartiment à l'autre.
- ✓ Eviter le passage du matériau mal préparé d'un compartiment de broyage à l'autre ;
- ✓ Assurer une zone de section libre adéquate au transfert du matériau et du passage du flux d'air et de gaz qui circulent à travers le broyeur.



**Figure 8: Constituants de cloison**



## ➤ Les corps broyants

Les corps broyants sont des pièces métalliques sphériques (boulets) introduites dans le broyeur pour assurer la fragmentation de la matière par interaction entre les forces et les effets produits par le mouvement avec le matériau.

### b)-Distribution de la charge broyante

La charge broyante de chaque compartiment doit être composée de corps broyants de différents diamètres et, par conséquent, posséder une composition et une distribution appropriées aux caractéristiques du matériau à broyer. En effet, le diamètre, le poids unitaire moyen et la surface spécifique des boulets qui composeront la charge broyante doivent être définis en fonction de la granulométrie et de la broyabilité du matériau, ainsi que de la finesse du produit final.

La définition de la taille maximale et minimale d'un boulet dépend de différents facteurs tels que:

- ✓ Caractéristiques du matériau à broyer;
- ✓ Dimension maximal de l'alimentation du matériau à broyer;
- ✓ Broyabilité et structure minéralogique du matériau à broyer;
- ✓ Type de circuit de broyage (ouvert, fermé);
- ✓ Dimensions du broyeur et des compartiments de broyage;
- ✓ Classe de séparateur et finesse du produit à obtenir.

Le profil de la charge est généralement de la forme suivante :

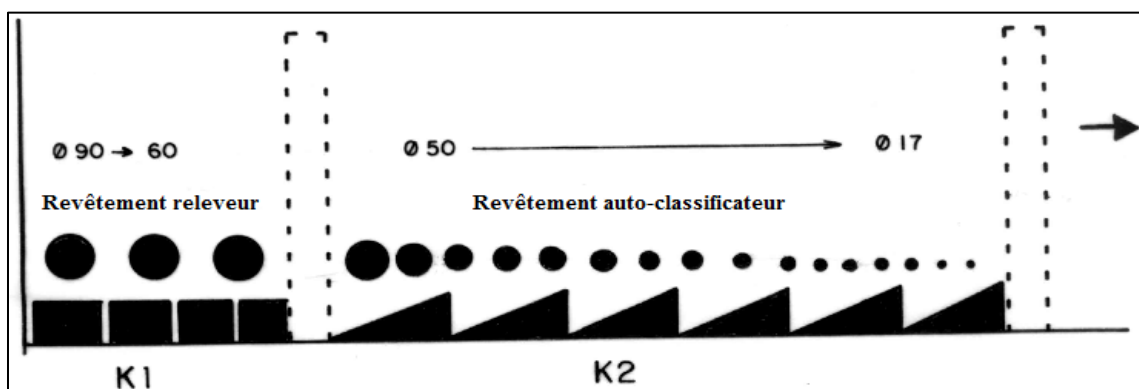


Figure 9: distribution de la charge broyante le long du broyeur

## ➤ Degré de remplissage ou charge spécifique

Il correspond au pourcentage du volume utile de chaque compartiment de broyage occupé par la charge broyante. Les valeurs normales utilisées sont de l'ordre de 26-30% pour la première chambre et de 30-34% pour la deuxième. En pratique, le degré de remplissage est déterminé selon différentes méthodes (nombre de plaques visibles, hauteur de vide).

### c)-La dynamique intérieure du broyeur

La rotation du broyeur tubulaire à boulets a lieu de façon à ce que les boulets qui composent la charge broyante soient élevés par attrition sur le revêtement jusqu'à une hauteur déterminée.

La vitesse de rotation du broyeur qui s'exprime en % vitesse critique (vitesse de rotation à partir de laquelle les forces centrifuges surpassent la force de gravité. A cette vitesse les boulets ne tombent plus en cascade mais restent collés à la paroi pendant toute la rotation). On atteint un optimum concernant l'efficacité de broyage à 75% de la vitesse critique <sup>[5]</sup>.

Lorsque le broyeur est en rotation, l'action de broyage peut intervenir de trois manières :

- Cascade : Les boulets culbutent le long de la surface de charge, l'accent est mis sur le broyage fin.
- cataracte : les boulets tombent en chute libre, dans ce cas de figure l'accent est mis sur le concassage.
- Attrition : abrasion de la matière, cela favorise le broyage fin <sup>[6]</sup>.

### d)-Consommation énergétique du broyeur

La puissance totale consommée par le broyeur doit toujours être inférieure à la puissance disponible ou nominale du moteur. Il faut, avant de charger et/ou de remettre de la charge broyante, toujours faire attention à ce paramètre afin que la puissance nominale mise à la disposition du moteur d'actionnement du broyeur ne soit jamais dépassée.

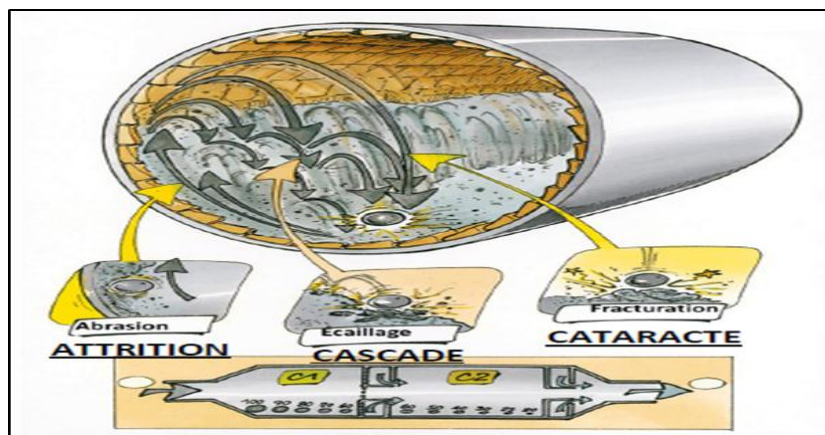


Figure 10 : Le mode de broyage

### e)-Contrôle du broyeur à boulets

Le contrôle des broyeurs consiste à la maximisation de la capacité de production et la minimisation de la consommation énergétique pour une production respectant les normes de qualité, de l'environnement et de la sécurité du personnel. L'atelier de broyage a constamment besoin d'optimisation car de nombreux facteurs peuvent conduire à des variations et affectent l'opération:

- ✓ Variation de la broyabilité;
- ✓ Variation de la granulométrie de l'alimentation;
- ✓ Variation de l'humidité et de la température;
- ✓ Usure (charge de boulets, équipements, ...) <sup>[7]</sup>.

### -Elévateur à godets

Le convoyeur à godets est caractérisé par le chargement et le déchargement de la matière. La prise de la matière se fait à la partie basse par écoulement continu et chute directe dans les godets.

### -Le séparateur dynamique

- **Description**

Il s'agit d'une enceinte cylindro-conique au sein de laquelle tourne un plateau à axe vertical. Le flux de gaz chargé en matières est mis en rotation grâce au rotor et la position des pales statiques. Il existe deux familles de séparateurs :

- ✓ Les séparateurs statiques.
- ✓ Les séparateurs dynamiques (1<sup>ère</sup> génération, 2<sup>ème</sup> génération et de 3<sup>ème</sup> génération).

Il permet de : -Séparer le matériau en une fraction fine et en une autre plus grosse;

-Augmenter l'efficacité des broyeurs ;

-Déterminer la taille maximum des particules du produit fini;

-Optimiser la récupération des fines.

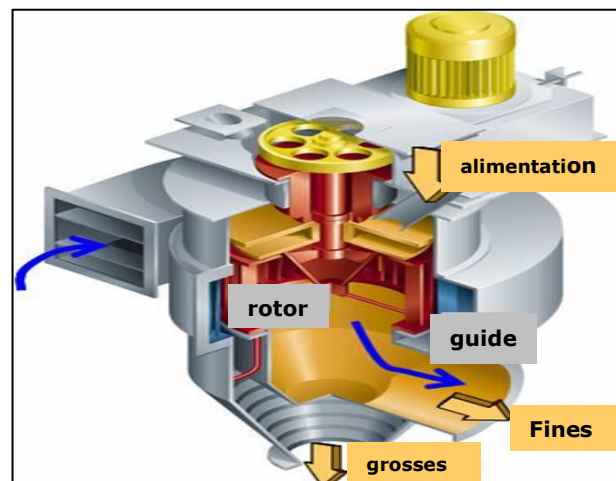


Figure 11: les différents flux entrant et sortant du séparateur dynamique de 3<sup>ème</sup> génération <sup>[6]</sup>

L'atelier de broyage BK1d'Asment TEMARA possède un séparateur dynamique de troisième génération. C'est le séparateur qui, aujourd'hui, offre les meilleures performances de séparation et la haute efficacité.

### **a)-Performances des séparateurs dynamiques**

Pour caractériser le fonctionnement du séparateur, plusieurs paramètres sont à déterminer :

#### **i) Le ratio de ventilation (Alimentation / Flux d'air)**

L'un des paramètres qui influence le plus sur la performance du séparateur. Il exprime le rapport de quantité de matériau alimenté au séparateur au flux d'air de séparation. Ce rapport traduit la dispersion de la matière dans le courant d'air.

#### **ii) La charge circulante (CC)**

Elle se définit en tant que rapport entre le flux d'alimentation par rapport à celui des fins. La C.C. optimale dépend: -Finesse du produit et la granulométrie de l'alimentation fraîche;

- Dimension du broyeur (L/D) et sa ventilation, profil de la charge broyante,
- Taille et type de séparateur.

La valeur de la CC doit être de 2 à 3. Une valeur n'appartenant pas à cet intervalle est une indication de dysfonctionnement du broyeur. En effet, une valeur très basse de CC traduit :

- Baisse de débit dans le broyeur et augmentation de temps de séjour ;
- Production des ultrafines qui donne naissance au problème d'enrobage.

Quand la valeur de CC est importante, ceci peut engendrer :

- Augmentation de flux de matière dans le broyeur et un temps de séjour très court ;
- Alimentation de séparateur par de grosses particules, Surcharge du séparateur et diminution de la productivité.

#### **iii) Efficacité**

L'efficacité d'un séparateur à x mm est définie comme le % du matériau alimenté au séparateur dans la gamme de 0 - x mm qui est envoyée vers les fines. La valeur de l'efficacité est déterminée analytiquement ou à partir de la courbe de Tromp.

#### **iv) La courbe de Tromp**

La courbe de Tromp ou courbe de partage représente la probabilité de rejet des particules en fonction de leur diamètre et permet de repérer les caractéristiques du séparateur:

- ❖ Le by-pass: la probabilité minimum de rejet. Dans un séparateur réel cela signifie qu'un certain % de l'alimentation ayant la dimension correcte pour être sélectionné fini par être rejeté.
- ❖ La limite d'acuité: Plus petit diamètre que le séparateur parvient à percevoir (au-dessous de ce diamètre, les particules sont traitées de façon identique par le séparateur).
- ❖ Le diamètre de coupure: correspond au diamètre des particules ayant une probabilité de 50% d'être envoyé vers les fins ou les rejets.
- ❖ L'imperfection: Représente l'incapacité du séparateur à sélectionner correctement les particules fines et grosses. Elle est calculée par rapport au diamètre  $d_{75}$ ,  $d_{25}$  et  $d_{50}$ .

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2d_{50}}$$

Ces paramètres doivent avoir des valeurs dans les intervalles recommandés traduisant les performances des séparateurs de 3<sup>ème</sup> génération.

Les performances du séparateur sont affectées par l'existence de fuites d'air ou d'air faux. Le bilan aéraulique du séparateur permet de quantifier la quantité d'air inutile dans celui-ci et d'évaluer la différence de pression entre son entrée et sa sortie<sup>[6]</sup>.

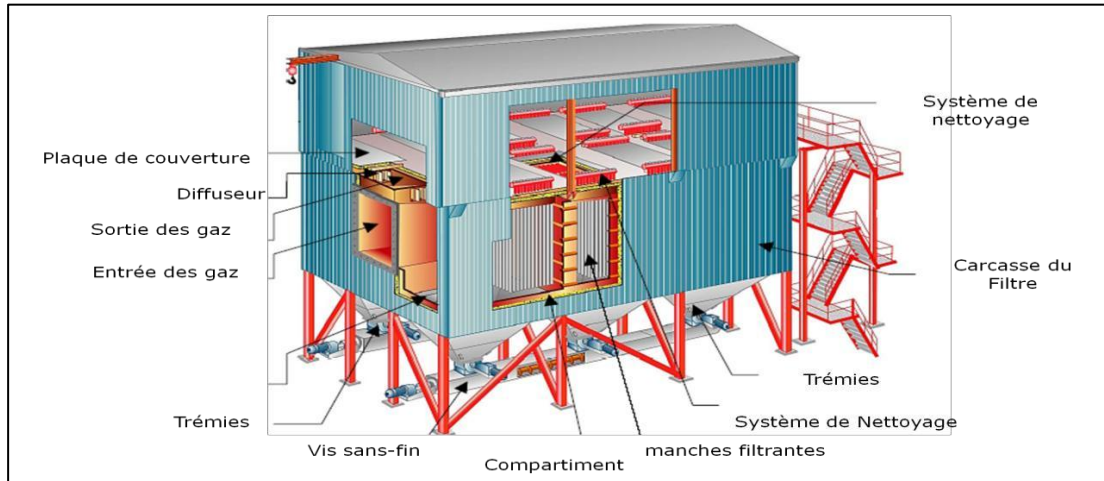
**Tableau 3: données technique du séparateur dynamique**

<b>Différence de pression au séparateur</b>	200-250mmH <sub>2</sub> O
<b>Ratio de ventilation</b>	<2Kg/m <sup>3</sup>
<b>Charge circulante(CC)</b>	2-3
<b>By-pass</b>	5 - 10 %
<b>Limite d'acuité</b>	≤15μm
<b>Imperfection</b>	<0,3
<b>Différence de pression filtre</b>	100-150mmH <sub>2</sub> O

#### **-filtre à manches du séparateur dynamique - filtre à manches du broyeur**

Pour répondre aux exigences environnementales en matière d'émission de poussières, les cimenteries utilisent des filtres à manches qui permettent la récupération des poussières d'un flux d'air. Le filtre à manches est l'un des moyens les plus performants de séparer les poussières transportées par une veine d'air, collectée dans un conduit. Elles sont définies selon deux caractères principaux

- Position des manches filtrantes : On peut distinguer essentiellement les appareils à manches horizontales et les appareils des manches verticales
- Principe de décolmatage : Réalisé par injection d'air comprimé. Il peut toutefois être aussi obtenu par secouage, ou à basse pression à partir d'un ventilateur affecté à cette fonction.



**Figure 12: les constituants du filtre à manches**

Le filtre perd en termes d'efficacité si le gaz entrant est de haute température ou encore si l'humidité du gaz est importante chose qui provoque le colmatage rapide des toiles filtrantes<sup>[8]</sup>.

**Tableau 4: données techniques du filtre à manche du séparateur et du broyeur**

<b>Filtre à manche du séparateur</b>	<b>Moyenne filtration</b>		MANCHE
	Type		POLYESTER
	Dimension des manches (Ø x L)	mm	158 * 4439
	Temperature maximal	°C	90
	Dépression	mbar	-260
<b>Filtre à manche du broyeur</b>	<b>Moyenne filtration :</b>		MANCHE
	Dimension des manches (Ø x L)	mm	127 * 2438
	Temperature maximal	°C	103

### **-Aérogليسeur**

Les aérogليسeurs constituent un système efficace, peu énergivore avec une maintenance faible, pour le transport en masse ou de faible quantité. C'est en fait l'air envoyé à travers la toile qui élimine la friction entre la poudre et le tissu :la poudre coule de manière régulière et sans à-coups.

**-Ventilateur pour broyage avec un moteur de 110 KW et Ventilateur pour séparateur avec un moteur de 330KW.**

# **CHAPITRE III : AUDIT ENERGETIQUE DE L'ATELIER DE BROYAGE BK 1**

# Introduction

Dans ce chapitre, on va calculer les différents bilans, matière, aéraulique et énergétique, et on va faire l'inspection des équipements majeurs de l'atelier BK1 afin d'analyser, interpréter et proposer des recommandations visant à améliorer son fonctionnement.

## I. Démarche de l'audit<sup>[6]</sup>

Pour mener à bien notre mission d'auditer l'atelier BK1, nous avons opté pour la démarche suivante:

### 1. Définition de la période d'audit

L'audit a été réalisé entre 13 et 15 avril 2015, en tenant en considération les périodes suivantes:

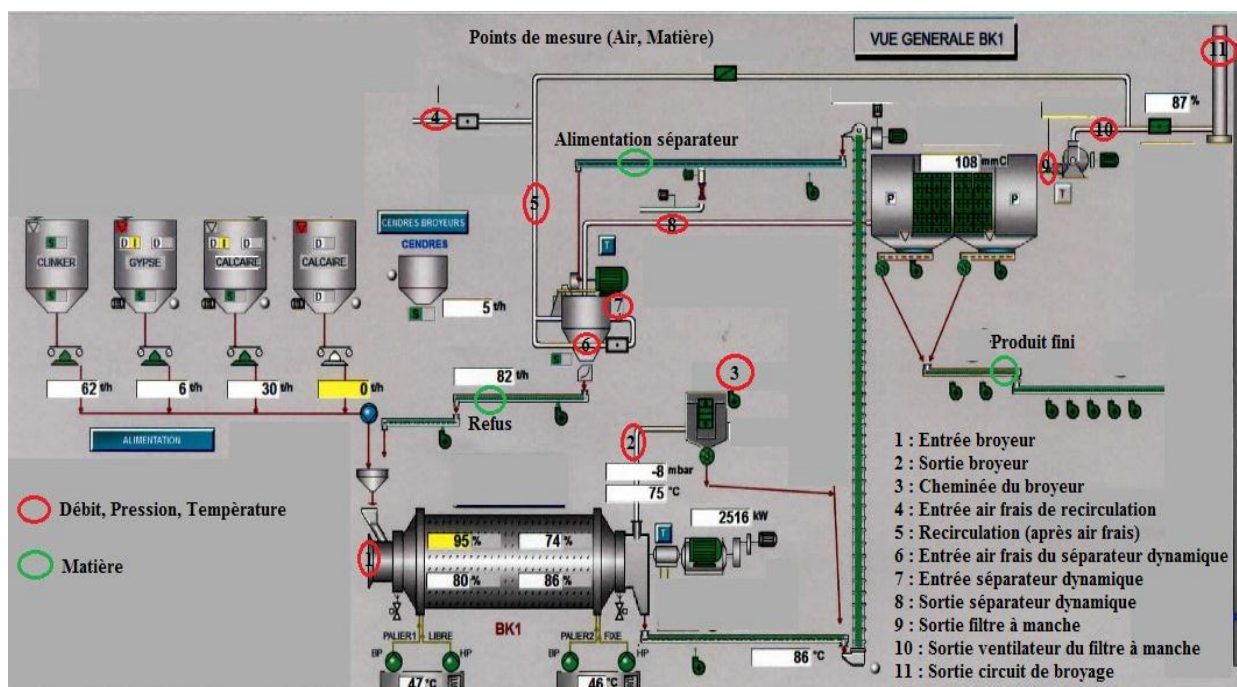
**Tableau 5: distribution de la période d'audit**

période	Durée	période effective
1	13 avril: 10h00-17h00	7h
2	13 avril 22h00-14 avril 3h00	5h
3	14 avril 17h00-15 avril 04h00	11h
total	----	23h

Le broyeur à ciment BK1 s'est arrêté le 13 avril à 17h47 due à une coupure d'alimentation et le 14 avril à 03h06 due à un niveau haut du silo de stockage ; la période effective totale d'audit était 23heures. Lors de l'audit, on a travaillé sur la qualité du ciment **CPJ35**.

### 2. Détermination des différents points de mesure

Nous avons déterminé les points de mesure d'air pour mesurer la température, la pression, le débit et les points de mesure de matière (alimentation séparateur, refus, produit fini). Figure 13



**Figure 13: Schéma montrant les différents points de mesure**



**3. Préparation des fiches de calcul.**(Voir annexe 1)

**4. Préparation du matériel de mesure.**(Voir annexe 1)

- Tube de Pitot de type S, thermomètre, anémomètre et le manomètre.

Après stabilisation de la marche de l'atelier, on prépare :

**5.Relevé des compteurs (compteurs électriques et matière).**(annexe 2)

**6. Mesure des débits, températures et pressions.**

**7. Echantillonnage de la matière au niveau de séparateur.**

**8. Crash-stop du broyeur et échantillonnage horizontal des boulets et de la matière.**

**9.Inspection interne du broyeur**

**10.Inspection interne du séparateur**

## II. Résultats et interprétations

### II-1. Conditions d'établissement de l'audit

Les différentes mesures que nous avons effectuées durant la période d'audit étaient dans les conditions atmosphériques indiquées dans le tableau 6.

**Tableau 6: Conditions atmosphériques pendant l'étude**

Conditions atmosphériques (valeurs moyenne durant la période d'audit)	
Température (°C)	21
Pression barométrique (mmHg)	760
Humidité absolue (%)	1.7

Les objectives qualités dans l'usine pour le type du ciment (CPJ35) sont les suivantes :

**Tableau 7: objectives qualités pour CPJ 35**

OBJECTIVES QUALITE		
Paramètre	Unité	objective
R <sub>80</sub> µm	%	< 6,0
SO <sub>3</sub>	%	< 4,0
CaOlibre	%	< 2,0

## II-2. Bilan aéraulique

### ➤ Mesure des débits

$$Q_e + Q_{\text{air faux}} = Q_s$$

Les données aérauliques principales du circuit sont mentionnées dans les tableaux ci-dessous. Les résultats principaux sont présentés dans le tableau 8.

**Tableau 8: les mesures aérauliques dans les points de mesure**

	T (°C)	P <sub>s</sub> (mmCE)	Débit (base humide)			V (m/s)
			(m <sup>3</sup> /h)	(Nm <sup>3</sup> /h)	(Nm <sup>3</sup> /Kg ciment)	
Entrée broyeur	24	0	1810	1664	0,01608	1,17
Sortie broyeur	81	-88	20600	15752	0,1522	13,3
Cheminée du broyeur	79	-1	23000	17836	0,1723	14,8
Entrée Air frais de recirculation	21	0	9020	8376	0,0809	0,3
Recirculation (après air frais)	76	-34	13390	10440	0,10087	2,43
Entrées air frais du séparateur dynamique	24	0	3890	3576	0,0345	0,30
Entrée séparateur dynamique	74	-33	137800	108070	1,0441	0,12
Sortie séparateur dynamique	82	-211	151700	114295	1,1043	16,57
Sortie filtre à manche	80	-334	157900	118198	1,1420	17,25
Sortie ventilateur du filtre à manche	84	-39	155200	118238	1,1423	16,95
Sortie circuit de broyage	84	0	28800	22024	0,2128	3,15

- **L'air faux**

$$\% \text{ Air faux} = \frac{Q_s - Q_e}{Q_s} * 100$$

Avec : Q<sub>s</sub> est le débit à la sortie

Q<sub>e</sub> est le débit à l'entrée

Le débit d'air faux dans chaque équipement de l'atelier de broyage est indiqué dans le tableau 9.

**Tableau 9: le débit d'air faux dans le circuit de broyage**

	Flux air faux (base humide)		% air faux du flux sortant
	(Nm <sup>3</sup> /h)	(Nm <sup>3</sup> /kg)	
Broyeur	14040	0,1376	78,8
Filtre à manche du broyeur+ ventilateur	2100	0,0204	11,8
Séparateur dynamique	6300	0,0625	5,3
Filtre à manche	3900	0,0352	3,3
Total du Circuit de broyage/au ventilateur	26340	0,2545	24,8

L'air faux total dans le circuit était de 26340Nm<sup>3</sup> / h, ce qui représente 24,8 % du flux total à la sortie du ventilateur. Le débit d'air faux dans la partie broyeur est réparti comme suit :87% de broyeur et 13% pour le filtre de broyeur ainsi que le ventilateur du broyeur. Le débit d'air faux dans la partie séparateur est réparti comme suit : 38% pour le filtre à manche du séparateur et de 62% pour le séparateur.

D'après les résultats de bilan aéraulique, on remarque que le pourcentage de l'air faux du broyeur est élevé, ce qui va engendrer des problèmes au niveau du broyeur et une augmentation de la consommation électrique de ventilation.

- **La différence de pression dans quelques équipements ( $\Delta P$ )**

La différence de pression était de 88mmCE pour le broyeur et 230mmCE pour le filtre de broyeur et 123mmCE pour le filtre à manche de séparateur. Le tableau 10 résume ces valeurs de ( $\Delta P$ ) ainsi que leurs limites correspondantes.

**Tableau 10: La différence de pression des équipements du circuit de broyage avec leurs limites acceptables**

	Pression dynamique (mmCE)	Référence (mmCE)
Broyeur	88	< 200
Filtre du broyeur	230	100 - 150
Filtre à manche du séparateur	123	100 - 150

On déduit que la différence de pression du broyeur et du filtre à manche du séparateur est conforme au standard, tandis qu'elle est supérieure au standard pour le filtre à manche du broyeur, donc peut être les manches sont colmatées ou bien il y a des entrées d'air faux.

### II-3. Bilan massique

La moyenne de la production totale obtenue à partir de l'audit en prenant en considération les erreurs des doseurs est de 102.0 t/h (base sèche, voir annexe 2) ayant la composition de 66,4% clinker, 4,4% de gypse, 24,3% de calcaire et de 5,1% des cendres volantes. L'humidité d'alimentation moyenne était de 1,4%, provenant principalement du calcaire (l'humidité = 5,1%) et le gypse (humidité = 1,36%).(Voir annexe 5)

Les refus pour 90  $\mu\text{m}$ , 80  $\mu\text{m}$ , 63  $\mu\text{m}$  et 45  $\mu\text{m}$  ainsi que la surface spécifique Blaine du produit fini sont indiqués dans le tableau 11.

**Tableau 11 : Refus et surface spécifique du ciment produit**

Qualité (produit fini)	Mesure
Refus 90 $\mu\text{m}$	4,0%
Refus 80 $\mu\text{m}$	5,4%
Refus 63 $\mu\text{m}$	13,6%
Refus 45 $\mu\text{m}$	26,6%
SSB	3440 $\text{cm}^2/\text{g}$

- **Date du dernier audit**

en 2010, la production moyenne était 109,1 t/h ( $R_{80\mu\text{m}}=5,8\%$  et  $R_{63\mu\text{m}}=12,2\%$ ). On remarque que la valeur obtenue à l'audit a baissée de 6,4% de celle-ci

Il faut aussi remarquer que la production obtenue lors de l'audit est diminuée de 11% en comparaison avec la production nominale qui est de 113 t/h.

On observe qu'on a eu presque le même refus pour l'audit en 2010 et l'audit qu'on a effectué, donc la production est basse pour trouver un même refus, ce qui est une perte pour l'usine.

- **Analyse granulométrique de la matière première**

L'échantillonnage de la matière première (clinker, calcaire, gypse et cendres volantes) et le produit fini (le ciment) ont été effectués durant la période d'audit. Les résultats des analyses granulométriques sont mentionnés dans l'annexe 3.

- **Caractérisation de la matière première**

La granulométrie de la charge d'alimentation conduit à:  $d_{80} = 16,0$  mm;  $d_{50} = 4,3$  mm et  $d_{20} = 0,5$  mm (en n'incluant pas l'alimentation des cendres volantes). Le clinker était grossier ( $d_{80} = 16,9$  mm;  $d_{50} = 6,2$  mm) et le gypse l'était aussi ( $d_{80} = 12,6$  mm;  $d_{50} = 2,6$  mm). (Voir annexe 5)

**NB. :** Les cendres volantes ont été alimenté à la sortie du broyeur précisément dans l'entrée de l'élévateur à godets en raison de leur comportement plus fine (de  $d_{80} = 0,1$  mm).

Ces données sont indiquées dans le tableau 12.

**Tableau 12 : Distribution de la taille granulométrique de l'alimentation**

	clinker	gypse	calcaire	Cendres volantes	alimentation
$d_{80}$ (mm)	16,9	12,6	10,3	0,1	16,0
$d_{50}$ (mm)	6,2	2,6	1,6	----	4,3
$d_{20}$ (mm)	0,5	0,3	0,3	----	0,5

La distribution de la taille granulométrique de l'alimentation est conforme au standard qui doit être inférieur à 20 mm.

En ce qui concerne la dureté, elle était 16,3 KWh/t pour le clinker, 11,0 KWh/t pour le calcaire et 8,9 KWh/t pour le gypse (la moyenne de l'alimentation = 14,6 KWh/t). Il est particulièrement important de noter que le clinker est légèrement difficile à broyer par rapport à 2010 (dureté clinker de 14,3KWh/t).

**NB. :** L'alimentation des cendres volantes n'était pas incluse dans le calcul en raison de leur alimentation à l'entrée de l'élévateur

- **Résistance**

En termes de résistance, le ciment CPJ35 répond aux objectifs préconisés par le laboratoire comme il est indiqué dans le tableau 13.

**Tableau 13 : la résistance du ciment produit CPJ35 en (2/7/28 jours)**

Résistance en 2 jours	Résistance en 7 jours	Résistance en 28 jours
7,9 MPa	17,4 MPa	26,1 MPa

- **Calcul du bilan massique**

Les données principales du bilan massique d'entrée sont présentées dans le tableau 14.

**Tableau 14: Bilan massique d'entrée**

	Base humide		humidité		Base sèche	
	(t/h)	(%)	(t/h)	(%)	(t/h)	(%)
Alimentation	103,5	99,6	1,4	72,5	102,0	100,0
Clinker	67,7	65,1	0,0	0,0	67,7	66,4
Gypse	4,6	4,4	0,4	3,2	4,5	4,4
Calcaire	26,1	25,1	1,3	68,6	24,7	24,3
Cendres volantes	5,1	4,9	0,0	0,7	5,1	5,0
Humidité d'entrée du broyeur	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0
Humidité dans l'air faux	0,3	0,3	0,3	18,0	0,0	0,0
Humidité dans l'air frais	0,1	0,0	0,2	8,2	0,0	0,0
Entrée total	104,0	100,0	1,9	100,0	102,0	100,0

Les données principales du bilan massique de sortie sont présentées dans le tableau 15.

**Tableau 15: Bilan massique de sortie**

	Base humide		humidité		Base sèche	
	(t/h)	(%)	(t/h)	(%)	(t/h)	(%)
Produit fini	102,7	98,8	0,6	32,9	102	100,0
humidité dans la sortie du broyeur	1,0	1,0	1,0	51,5	--	---
humidité dans la sortie du séparateur	0,3	0,3	0,3	15,6	---	---
Total Sortie	104,0	100,0	1,9	100,0	102,0	100,0

On remarque que le débit massique à l'entrée est égal au débit massique à la sortie, donc on n'a pas de perte de matière au cours du circuit de broyage.

Les températures des matières dans le circuit de broyage sont présentées dans le tableau 16.

**Tableau 16: Température des matières dans le circuit de broyage**

Température des matières (°C)	
Alimentation	67
Clinker	87
Calcaire	20
Gypse	23
Cendres volantes	37
Alimentation du séparateur dynamique	88
Rejets séparateur dynamique	74
Produit fini	80

On remarque que la température est élevée pour le clinker, ce qui est normal parce qu'il est refroidi jusqu'à une température inférieure à 100 °C après sa sortie du four avec une  $T=1450^{\circ}\text{C}$ . Du coup celle de l'alimentation augmente. On a mesuré aussi une température élevée pour l'alimentation du séparateur dynamique, ses rejets et du produit fini provenant du frottement des matières et de la charge broyante à l'intérieur du broyeur.

#### II-4. Bilan énergétique

- **Calcul de la chaleur d'entrée et de sortie du broyeur**

Pour une température de référence égale à 20°C, les données principales du bilan thermique d'entrée sont indiquées dans le tableau 17.

**Tableau 17: Bilan thermique à l'entrée broyeur**

	T (°C)	Débit (kg/h) (Nm <sup>3</sup> /h)*	Cp kcal/(kg°C) kcal/(Nm <sup>3</sup> °C)	Q		(%)
				(10 <sup>3</sup> kcal/h)	(kcal/kg)	
Entrée air du broyeur	24	1664*	0,3124	2,1	0,02	0,057
Alimentation (base sèche)	65	102000	0,1834	841,8	8,25	23,5
Humidité de l'alimentation	65	1403	1,0000	63,1	0,62	1,80
Rejets séparateur	74	61214	0,1845	610,0	6,0	17,08
Humidité du rejet séparateur	74	382	1,0000	20,5	0,2	0,57
Air faux broyeur	21	13127	0,3124	4,1	0,04	0,11
Moteur du broyeur	---	---	---	2036,6	20,0	56,9
Total entrée	---	---	---	3578,1	35,13	100,0

On remarque que la grande partie de la chaleur fournie provient principalement du moteur du broyeur.

Les données principales du bilan thermique de sortie sont indiquées dans le tableau 18.

**Tableau 18: Bilan thermique de la sortie broyeur**

	T (°C)	Débit (kg/h) (Nm <sup>3</sup> /h)*	Cp  kcal/(kg°C) kcal/(Nm <sup>3</sup> °C)	Q		(%)
				(10 <sup>3</sup> kcal/h)	(kcal/kg)	
Sortie air du broyeur	81	15752	0,3158	303,4	3,0	8,5
Produit fini (base sèche)	88	163000	0,1862	206,4	19,2	54,9
Humidité du produit final	88	967	1,0000	65,8	0,6	1,8
Produit fini allant avec l'air	81	8162	0,1854	92,3	0,9	2,6
Humidité des gaz produits	81	51	1,0000	3,1	0,0	0,1
Evaporation de l'eau des matières alimentées	---	766	---	449	4,4	12,5
Pertes (Rayonnement + convection et les indéterminés)	---	---	---	700,9	6,8	17,1
Total sortie	---	---	----	3578,1	35,1	100,0

A la sortie, la grande partie de la chaleur fournie provient principalement du produit fini, Cela est dû au frottement entre la charge broyante et la matière plus la température élevée de l'alimentation.

**NB.** :Il y a aussi un registre d'air frais dans le circuit de recirculation qui était ouvert (~95%) ; 2 des 3 entrées d'air frais dans le cône du séparateur était de 50% et 70% ouverte lors de l'audit.

- **Consommation électrique**

La consommation de l'énergie électrique de l'atelier de broyage BK1 a été obtenue par la lecture des compteurs installés dans la chambre électriques. Les consommations de l'énergie électrique du moteur du broyeur, ventilateur du séparateur et les autres équipements (auxiliaires : faibles voltage) ont été déterminées par la même méthode. La consommation énergétique du séparateur a été calculé par la moyenne des intensités durant la période d'audit (149 A), voltage (380V) et  $\cos\varphi = 0,90$ .



**Tableau 19: Consommation électrique des équipements de l'atelier de broyage**

	Totale (kW)	Consommation spécifique	
		KWh/t	(%)
Moteur de broyeur	2680	26,3	88,0
Séparateur	88	0,9	3,0
Ventilateur de séparateur	179	1,75	5,85
Autres (calculé)	99	0,97	3,24
Totale	3047	29,9	100,0

La consommation énergétique de BK1 est de 29,9 kWh/t (pour la production sèche). On déduit que cette valeur est conforme au standard qui est de 31 kWh/t.

## II-5. Equipements majeurs

### II-5-1 Broyeur

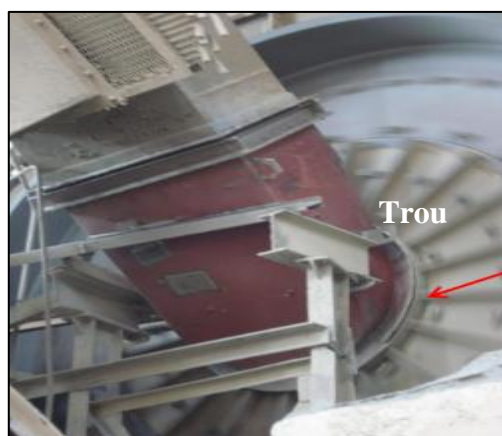
La vitesse de l'air à l'intérieur de la première chambre était 0,31 m / s avec la charge et pour la deuxième chambre était de 0,30 m / s avec charge. Pour le broyeur à ciment opérant à circuit fermé nous considérons ces valeurs comme faible (référence: 1,0 - 2,0 m / s); toutefois, la vitesse optimale dépend de la conception du broyeur, principalement la charge des boulets du broyeur et l'efficacité du séparateur dynamique. On peut remédier à cette diminution de vitesse en ouvrant d'avantage le registre situé à la sortie du ventilateur du broyeur.

- **Inspection interne du broyeur**

L'inspection interne du broyeur a été effectuée le 15 Avril 2015 après le crash-stop du broyeur.

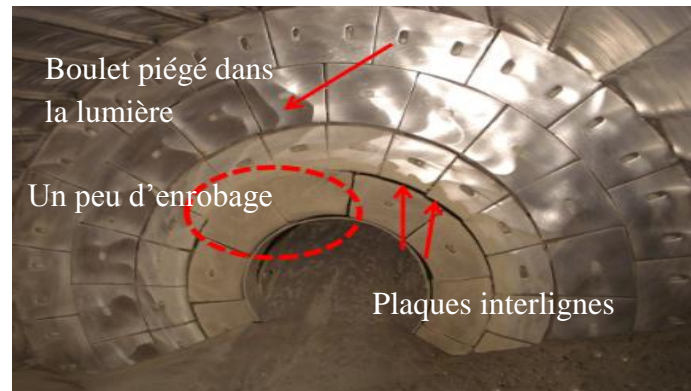
- **Première chambre**

La gaine d'entrée était dans des conditions acceptables malgré la présence d'un trou qui fait entrer l'air faux.



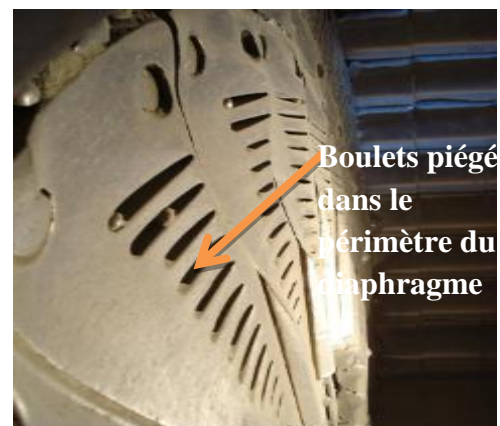
**Figure 14 : image de la gaine d'entrée broyeur**

Le blindage était releveur, et dans des conditions acceptables sauf deux plaques de blindages étaient cassées, en outre, on n'a pas trouvé un enrobage considérable du blindage. La présence de la ferraille entre les plaques de blindage a été remarquée (principalement entre les anneaux où les plaques étaient trop interligne). La photo qui montre l'état du blindage est présentée dans la figure 15.



**Figure 15 : image montrant l'état de la plaque de blindage de la première chambre**

Pour ce qui concerne le diaphragme intermédiaire, on a pu détecter quelque signe d'usure, donc, peut-être le taux de quartz est élevé dans l'alimentation ou bien l'impact entre les boulets et le blindage. Et on a trouvé quelques boulets piégé à l'intérieur des lumières. (Voir figure 16).

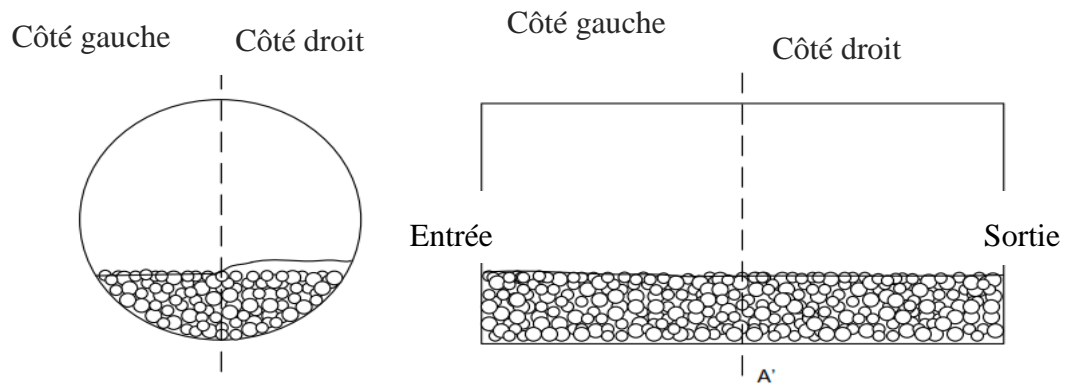


**Figure 16 : image de l'état du diaphragme intermédiaire**

#### ❖ Degré de remplissage

Dans la vue transversale de la première chambre, le niveau de la matière n'était pas uniforme dans les deux côtés du broyeur, où on trouve la matière est au-dessus de la charge broyante surtout du côté droit. Et on remarque que la matière couvrait les boulets jusqu'à la moitié.

La mesure du degré de remplissage (boulets+matière) a donné 30%, le pourcentage des boulets déformés trouvé était d'environ 13%, ce qui est considérablement élevé.

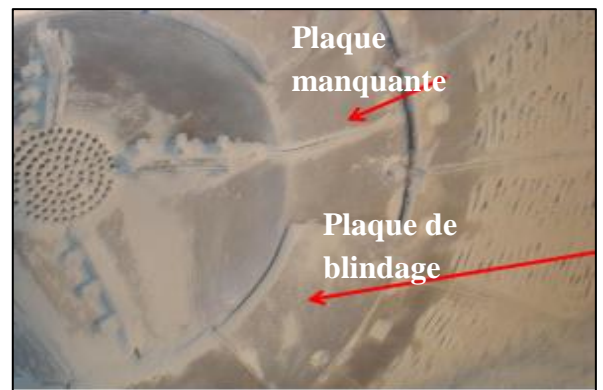


**Figure 17 : vue transversale du côté de l'entrée et vue longitudinale de BK1**

- **Deuxième chambre**

On a inspecté le diaphragme intermédiaire de l'autre côté (deuxième chambre), et on a remarqué que la présence de la ferraille entre les plaques est considérablement élevée (figure 19). En observant le diaphragme de décharge, on a détecté une plaque manquante de l'anneau interne comme il est

indiqué dans la photo. (Figure 18)



**Figure 18 : à gauche : image de la ferraille dans les lumières du diaphragme intermédiaire**

**A droite : image du diaphragme de décharge indiquant la plaque qui manque**

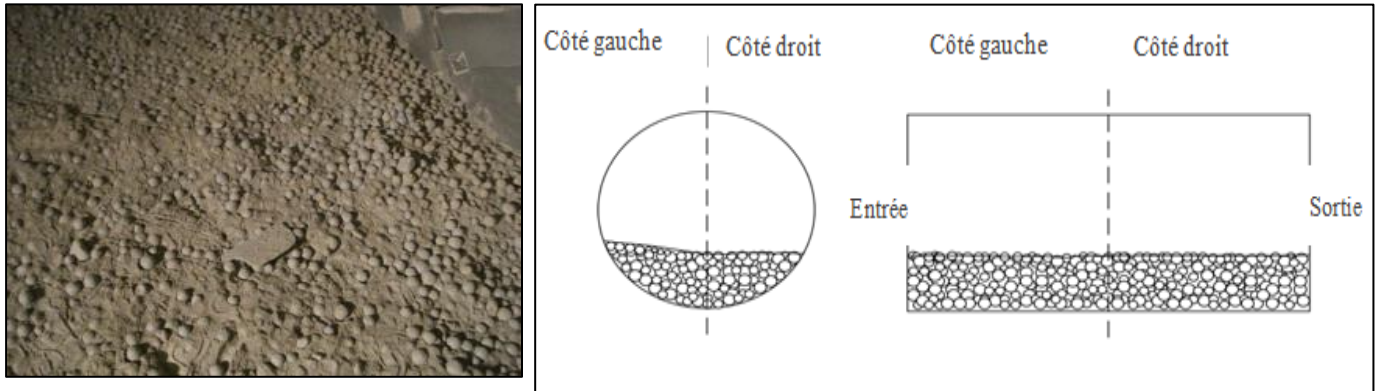
Les plaques n'étaient pas bien alignées avec une plaque cassée, et on a pu déduire de leur état qu'ils ont un faible effet classificateur. L'état du blindage est indiqué dans la figure 19.



**Figure 19: image de l'état du blindage de la deuxième chambre**

### ❖ Degré de remplissage

Le degré de remplissage mesuré a donné 29 % (boulets + matière), le pourcentage des boulets déformés trouvé était d'environ 11 %, ce qui est considérablement élevé. Il faut aussi mentionner que la présence de la ferraille et des gruaux est élevée. L'état de la charge est présenté dans la figure 20.



**Figure 20 : à gauche : image de la charge à l'intérieur de la deuxième chambre  
A droite :vue transversale du côté de sortie et vue longitudinale de BK1**

- **Distribution de la charge des boulets**

Le degré de remplissage des boulets seulement n'a pas été calculé, mais, en général, cette valeur est d'environ 2 % de moins que le degré de remplissage des boulets plus la matière, ce qui correspond à 28 %, c'est une valeur acceptable, mais inférieur à l'attendu considérant les boulets chargés.

**Tableau 20: Charge des boulets 1ère chambre**

Boulets (mm)	original		Chargé		Echantillonné	
	(%)	(t)	(%)	(t)	(%)	(t)
[95-85]	26,5	18,0	26,9	18,0	--	--
[85-75]	29,5	20,0	31,3	21,0	43,9	28,3
[75-65]	32,4	22,0	25,4	17,0	32,2	20,8
[65-55]	11,8	8,0	16,4	11,0	17,4	11,2
[55-45]	--	--	--	--	3,5	2,3
[45-35]	--	--	--	--	0,9	0,6
<b>Charge contaminée</b>	--	--	--	--	2,1	1,3
total	100,0	68,0	100,0	67,0	100,0	64,4
<b>Boulets déformés</b>	--	--	--	--	13,4	--
<b>Degré de remplissage (%)</b>	30,0		29,6		28,4	
<b>Poids moyen (g)</b>	1684		1646		656	

En comparant la charge de boulets échantillonnés avec celles chargées, il est remarqué que le poids de la charge échantillonnée est environ 4% inférieur à celle chargée à cause de l'usure des boulets.

Le profil de la charge de boulets ne semble pas le plus approprié, il n'y a pas de boulets de 90 mm. Or, la recommandation est comprise entre 25 et 30%. La teneur élevée par les boulets de 80 mm reflète l'usure des boulets de 90 mm. De plus, la première chambre ne devrait pas avoir des boulets de diamètre plus petit que 60 mm, cependant, 7% de la charge totale est inférieur à 60 mm menant dans une surface spécifique plus élevée que celle des boulets chargés. Les boulets déformés trouvés dans le milieu de broyage correspondent à 13,4 % du poids total de la charge des boulets échantillonnée, ce qui est considérablement élevé, et ils doivent être éliminés. Dans la deuxième chambre, Le degré de remplissage des boulets seulement n'a pas été calculé, mais, en général, cette valeur est d'environ 2 % de moins que le degré de remplissage des boulets plus la matière, ce qui correspond à 27 %, qui est une valeur légèrement faible. (Tableau 21)

**Tableau 21: charge des boulets dans la 2ème chambre**

Boulets (mm)	original		Chargé		Echantillonné	
	(%)	(t)	(%)	(t)	(%)	(t)
[55-45]	14,7	21,0	10,2	15,0	4,5	6,0
[45-35]	20,3	29,0	12,9	19,0	22,9	30,8
[35-27,5]	20,3	29,0	26,5	39,0	37,7	50,6
[27,5-22,5]	22,4	32,0	24,5	36,0	20,4	27,4
[22,5-18,5]	22,4	32,0	25,9	38,0	14,3	19,2
[18,5-16,5]	--	--	--	--	0,3	0,3
< 16,0	--	--	--	--	0,0	0,0
<b>total</b>	100,0	143,0	100,0	147,0	100,0	134,3
<b>Boulets déformés</b>	--	--	--	--	10,9	--
<b>Degré de remplissage (%)</b>	29,2		30,0		27,4	
<b>Poids moyen (g)</b>	76		68		83	
<b>Diamètre moyen (mm)</b>	32		30		31	

En comparant la charge de boulets échantillonnés avec celles chargées, il peut être remarqué que le poids de la charge échantillonnée est environ 9 % inférieur à celle chargée à cause de l'usure des boulets.

Le profil de la charge de boulets ne semble pas le plus approprié, la quantité des boulets de diamètre 50 mm est faible par rapport au profil chargé. La teneur élevée par les boulets de 40 mm et de 30 mm reflète l'usure des boulets de 50 mm. Malgré cela, la surface spécifique obtenue est inférieure à celle des boulets chargés. De plus, le pourcentage des boulets déformés correspond à 10,9 % du poids total de la charge des boulets échantillonnées, ce qui est considérablement élevé, donc on recommande leur élimination.

- **Distribution granulométrique dans le broyeur**

L'échantillonnage de la matière à l'intérieur du broyeur a été réalisé par chaque mètre, le long du broyeur. Le profil granulométrique de la matière à l'intérieur du broyeur en utilisant les résultats du laboratoire, ainsi que le profil de la charge des boulets sont dessinés dans le graphique de la figure 21.

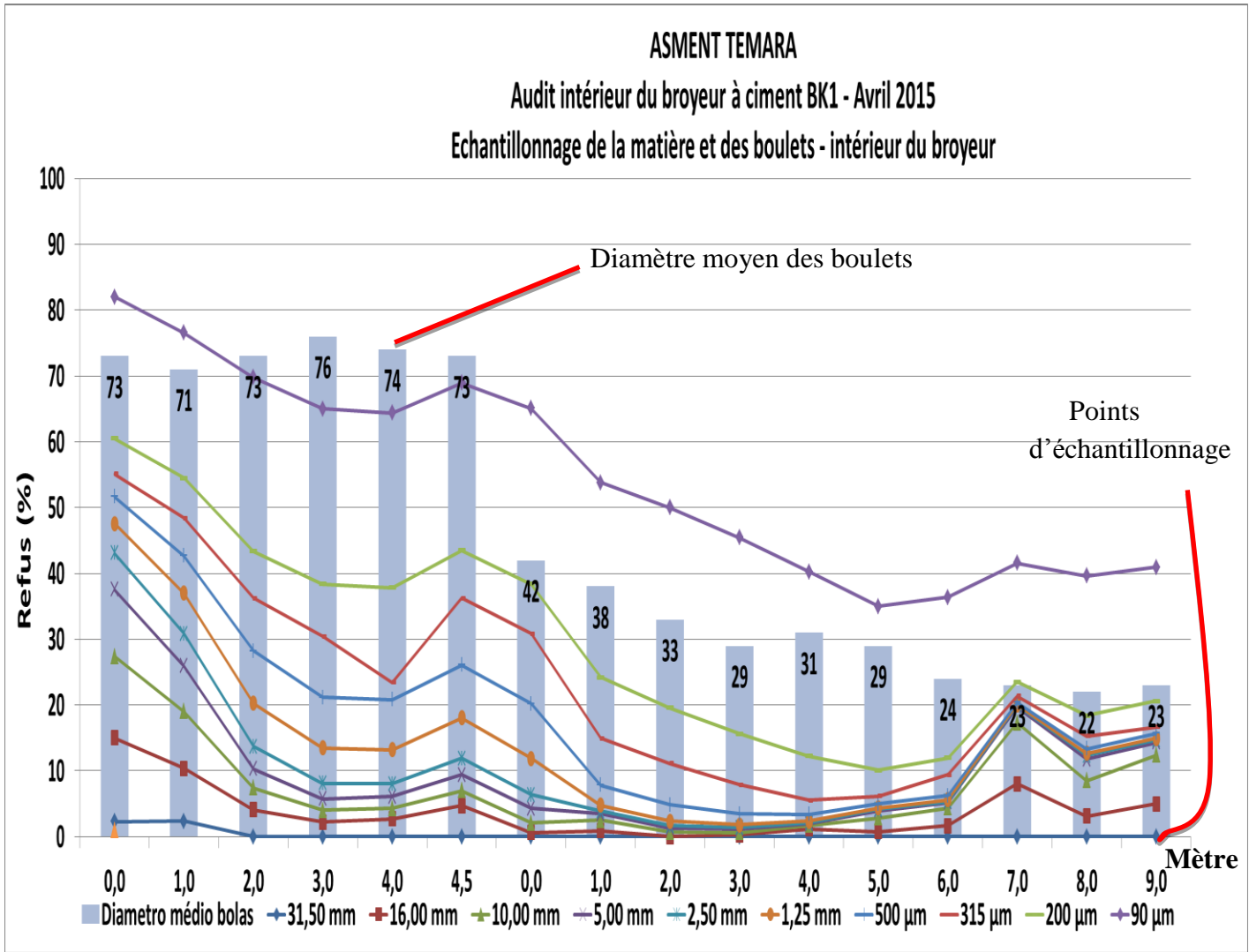


Figure21 : profil de la matière et des boulets à l'intérieur du broyeur

Dans la première chambre, la granulométrie commence à augmenter entre 4 m et 4,5 m (la fin de la chambre), cela révèle un petit manque de broyage pour la matière grossière, peut être en raison de l'absence des boulets de 90 mm et de l'inefficacité du broyage dans cette zone en raison de l'enrobage des plaques releveurs ou du mauvais blindage, ou la finesse augmente à cause de l'accumulation de la matière juste avant le diaphragme intermédiaire.

Dans la deuxième chambre, la performance de la charge des boulets est acceptable car il y a une réduction de la granulométrie de la matière mais l'effet de broyage est seulement remarqué presque jusqu'à la moitié de la longueur de ce compartiment. Donc, cela peut provenir d'un mauvais blindage dans cette zone de 5 m à 9 m ainsi que la faible quantité des boulets de diamètre 50 mm, ou bien l'accumulation des gruaux qui bloquent les fentes.

## II-5-2 Séparateur dynamique

### 5-2-1 Inspection du séparateur dynamique

Durant l'inspection du séparateur, il a été remarqué que le revêtement intérieur de la paroi a été légèrement usé et la densité commence à apparaître. Les ailerons ont été fixés ; cependant il convient de mentionner que l'ouverture entre eux n'est pas régulière et donc le débit d'air peut être affecté. En général et en tenant en compte les résultats des paramètres de séparateur qui ont dans le standard, on peut conclure que le séparateur est en bon marche.

**Tableau 22 : Les paramètres de marche caractérisant la charge aéraulique et massique du séparateur dynamique**

caractéristique	Valeur mesuré	Référence
La charge circulante	1,60	1,5 - 2,0
La charge spécifique des fines du séparateur	9,2 t/h.m <sup>2</sup>	10 – 12 t/ h.m <sup>2</sup>
le rapport d'alimentation du séparateur / flux de gaz	1,2 kg/m <sup>3</sup>	< 2,5 kg/m <sup>3</sup>
Le rapport fines du séparateur / flux de gaz	0,7 kg/ m <sup>3</sup>	< 0,75 kg/m <sup>3</sup>
La vitesse du gaz	3,5 m/s	~4 m/s
by-pass	4 %	5 – 10 %
imperfection	0,21	~0,3
limite d'acuité	36 µm	10 – 15 µm

La valeur de la charge circulante de séparation est dans la plage normale pour ce type de séparateur et la finesse du ciment produit. L'alimentation du séparateur était 163,2 t/h. les rejets du séparateur étaient 61,2 t/h (base sèche et d'après l'analyse granulométrique).

La valeur de la charge spécifique des fines du séparateur bénéficie la séparation, pour que le séparateur ne soit pas surchargé.

La vitesse du gaz à travers le séparateur est un légèrement petite, pour ce fait il faut augmenter le débit du gaz.

### **III. OBSERVATIONS ET RECOMMANDATIONS**

#### **III-1. Production et consommation d'énergie**

- **La production**

La production obtenue par l'audit (102t/h) était d'environ 11 % inférieure à la production nominale (115 t / h). À y parvenir, il est recommandé de revoir le profil de la charge des boulets pour augmenter légèrement le degré de remplissage.

- **La consommation d'énergie**

La consommation d'énergie obtenue lors de l'audit était de 29,5 kWh / t (base humide), ce qui représente environ 4 % de moins qu'en 2009 et de Janvier à Septembre 2010 (30,9 kWh / t).

Pour la consommation énergétique du séparateur, la valeur obtenue du compteur n'était pas fiable (environ 18 kW), elle est très faible en comparaison avec la puissance installée de ce moteur qui est de 220 kW. Ainsi, il est recommandé que l'usine doive vérifier ce compteur.

#### **III-2. L'erreur des doseurs**

L'erreur trouvée pour le doseur du calcaire était de +7,04 %, or la valeur acceptable est  $\pm 3,0$  %. En outre le calcaire représente 25 % de l'alimentation totale, il est donc recommandé de faire un calibrage des doseurs du clinker et du calcaire et vérification de ceux du gypse et des cendres volantes.

#### **III-3. La vitesse de broyeur**

La vitesse de l'air à l'intérieur du broyeur était faible pour les deux chambres (0,3 m / s). Comme le registre du ventilateur n'est pas ouvert à 100%, nous recommandons de tester l'augmentation progressivement du débit d'air à l'intérieur du broyeur en ouvrant d'avantage le registre du ventilateur, mais avant d'effectuer ce test, les fentes doivent être nettoyés et le broyeur devrait avoir une charge des boulets classé avec un degré de remplissage correct.



### III-4. Le Profil de la charge des boulets et l'évolution granulométrique à l'intérieur du broyeur

- **Première chambre**

En dépit de la granulométrie du matériau qui diminue progressivement de l'entrée vers la sortie de cette chambre, la performance n'est pas satisfaisante. L'accumulation de matière grossière à l'extrémité de cette chambre est claire.

En résumé, nous recommandons d'effectuer les actions suivantes dans la première chambre:

- ✓ Retirer les boulets déformés et la ferraille de la charge des boulets.
- ✓ Augmenter le degré de remplissage à 30% (boulets) comme celle chargées
- ✓ Utiliser un profil similaire pour la charge des boulets comme celui recommandé par la charge originale.

Comme il est déjà mentionné dans l'audit de BK1, il est recommandé fortement de revoir la classification de la charge broyante; sinon la charge de boulets proposés indiqué ci-dessous pourrait ne pas être efficace. Le profil de la charge des boulets proposé pour cette chambre est présenté dans le tableau 23.

**Tableau 23: la charge des boulets proposés pour la 1<sup>ère</sup> chambre**

Le broyeur doit être rempli avec 90 % de la charge des boulets (selon le tableau ci-

Boulets (mm)	Proposée		90 %
	(%)	(t)	(%)
90	26,5	18,0	16,2
80	29,4	20,0	18,0
70	32,4	22,0	19,8
60	11,7	8,0	7,2
Total	100,0	68,0	61,2
Degré de remplissage(%)	30,0		27,0
Poids moyen (g)	1685		---

dessus). Après cela, un nouvel échantillonnage de la matière à l'intérieur du broyeur doit être effectué afin d'analyser le profil granulométrique de la matière pour évaluer la performance et, si nécessaire, ajuster la répartition de la charge des boulets.

- **Deuxième chambre**

La performance de la charge des boulets est acceptable car il ya une réduction de la finesse matière, mais l'effet de broyage est seulement remarqué presque jusqu'à la moitié de la longueur de ce compartiment.

En résumé, nous recommandons d'effectuer les actions suivantes dans la 2<sup>ème</sup> chambre :

- ✓ Retirer les boulets déformés et la ferraille de la charge des boulets.
- ✓ Accroître le degré de remplissage à 29% (boulets).
- ✓ Réduire le pourcentage des boulets de 50 et 40 mm.

Le profil de la charge des boulets proposé pour cette chambre est indiqué dans le tableau 24.

**Tableau 24: la charge des boulets proposés pour la 2<sup>ème</sup> chambre**

<b>La charge des boulets proposée – 2<sup>ème</sup> chambre</b>			
Boulets (mm)	proposée		90 %
	(%)	(t)	(%)
50	10,0	14,2	12,8
40	10,0	14,2	12,8
30	30,0	42,6	38,3
25	25,0	35,5	31,9
20	25,0	35,5	31,9
Total	100,0	142,0	127,8
Degré de remplissage	29,0		26,1
Poids moyen	68		---

Le broyeur doit être rempli avec 90 % de la charge des boulets (selon le tableau ci-dessus). Après cela, un nouvel échantillonnage de matière à l'intérieur du broyeur doit être effectué afin d'analyser le profil granulométrique de la matière pour évaluer la performance, et si nécessaire, ajuster la répartition de la charge des boulets.

## **III-5. Le Séparateur dynamique**

### **III-5-1 L'inspection interne**

Les observations sont déjà détaillées dans le chapitre précédent. En résumé, nous recommandons les actions suivantes :

- renforcer le revêtement intérieur de la paroi du guide.
- normaliser la distance entre les ailerons.

### **III-5-2 Consommation d'énergie**

Les données techniques du séparateur dynamique montrent un moteur d'une puissance nominale de 220 kW. Cependant, en utilisant les compteurs lues lors de l'audit, la puissance était d'environ 18 kW et la consommation spécifique ne semble pas fiable (0,17 kWh / t). Par conséquent, nous avons calculé à l'aide des consignes de la salle de contrôle pendant la période d'audit l'intensité moyenne (149 A), tension (380 V) et  $\cos\varphi = 0,90$ , et on a obtenue 88 kW  $\rightarrow$  0,9 kWh / t. Nous recommandons que ce compteur doive être vérifié.

### **III-5-3 La performance**

La vitesse du gaz à travers le séparateur était 3,5 m / s, nous recommandons une augmentation du débit d'air par l'ouverture du registre d'air frais (le flux était de 137 800 m<sup>3</sup>/h et la valeur prévu est de 150 000 m<sup>3</sup> / h)

## **III-6. Inspection interne du broyeur**

### **Première chambre**

- **Entrée 1<sup>ère</sup> chambre –gaine d'entrée**

- fermer le trou de la gaine d'entrée laissant entrée l'air faux et nettoyer les plaques.

- **Le diaphragme intermédiaire (côté 1<sup>ère</sup> chambre)**

- conserver les fentes propres (ferraille libre).

- suivre avec attention les plaques de blindages et examiner leurs emplacements.

- **Blindage de la 1<sup>ère</sup> chambre**

- Remplacer les deux plaques cassées près du diaphragme intermédiaire.

## 2<sup>ème</sup> chambre

- **Le diaphragme intermédiaire (côté 2<sup>ème</sup> Chambre)**

- suivre avec attention les plaques de blindages, et principalement l'anneau externe.

- **Diaphragme de décharge**

- conserver les fentes propres (ferraille libre).

- remplacer la plaque manquante de l'anneau interne.

- **Blindage de la 2<sup>ème</sup> Chambre**

- suivre avec attention les plaques de blindages car l'effet classificateur est en baisse.

### III-7. Entrées air faux

L'air total dans le circuit du broyage correspond à environ 24,8 % du débit d'air sortant du circuit. Cette valeur peut être acceptable (standard doit être inférieur à 20%) mais c'est mieux de l'améliorer par la détection de quelques entrées d'air faux. On recommande la réduction d'air faux pour réduire la consommation du ventilateur du filtre broyeur.

## IV. Calcul économique des gains provenant de l'élimination des défaillances de l'atelier de broyage BK1

Les actions recommandées vont assurer un gain en matière, et par suite un gain financier considérable qui peuvent être exprimé comme suit.

### IV-1. Gain en matière

La moyenne de la production totale obtenue à partir de l'audit est de 102 t / h, tandis que celle obtenue à partir de l'audit en 2010 est de 109 t / h. le calcul de la différence entre les deux productions nous donne :

$$109 \text{ t / h} - 102 \text{ t / h} = 7 \text{ t / h}$$

On déduit la production annelle gagnée (en arrivant à la moyenne de la production obtenue en 2010) qui est de l'ordre de :

$$7 \text{ t / h} * 24 \text{ h} * 365 \text{ jours} = 61 \text{ 320 t}$$

## IV-2. Gain financier

En premier lieu, la consommation énergétique de l'atelier de broyage ciment BK1 est de l'ordre de 3047 KW, ce qui indique une consommation spécifique de :

$$3047 \text{ (KW)} / 102 \text{ (t / h)} = 29,9 \text{ KWh / t}$$

$$3047 \text{ (KW)} / 109 \text{ (t / h)} = 27,9 \text{ KWh / t}$$

La différence entre les deux nous mène à :

$$29,9 \text{ KWh / t} - 27,9 \text{ KWh / t} = 2 \text{ KWh / t}$$

L'usine produit **530 000 t / an**, donc en tenant en considération le gain de la consommation spécifique précédent, on trouve le gain annuel qui est de :

$$530\,000 \text{ t / an} * 2 \text{ KWh / t} = 1\,060\,000 \text{ KWh / an}$$

Le prix du KWh est estimé à 0,75 DH / KWh, du coup, le gain financier obtenue est de :

$$1\,060\,000 \text{ KWh / h} * 0,75 \text{ DH / KWh} = 795\,000 \text{ DH / an}$$

## **CHAPITRE IV**

# **ETUDE DE L'AMELIORATION DU RATIO C/K DE L'ATELIER DE BROYAGE PAR AJOUT D'AGENTS DE MOUTURE POUR LA QUALITE DE CIMENT CPJ35**

## Introduction

Le broyage du clinker est une opération énergivore et son rendement énergétique est modeste. En plus, différentes lois ont montrées que cette énergie augmente de manière exponentielle avec la finesse. Plusieurs travaux de recherche sur le broyage, du clinker, constatent que la qualité de broyage de celui-ci avec des ajouts minéraux est généralement meilleure que celle du clinker broyé seul.

Le souci majeur de toute cimenterie, notamment ASMENT TEMARA, est d'avoir un rapport C/k optimal soit un KWh/t le plus faible possible. Puisque le clinker est l'élément le plus difficile à broyer, une diminution de son taux d'utilisation permettra donc de faire des économies importantes en termes de consommation énergétique, soit une augmentation notable de la production. Pour ce faire des produits sont ajoutés en très faibles quantités lors du broyage, appelés « agents de mouture ».

Cette partie est consacrée à l'analyse des résultats d'une série d'essais que nous avons effectuée au sein du laboratoire ASMENT TEMARA et qui ont pour but de déterminer l'effet de deux agents de mouture M et G sur les performances du broyeur ainsi que sa contribution à l'amélioration du rapport C/K.

## **I- Agent de mouture**

### **I-1. Définition et fonction:**

Les agents de mouture sont des composés organiques, le plus souvent à base de glycols et d'acides aminés se présentant sous forme de poudre ou de liquide, leur pH est compris entre 8 et 11, ils sont dosés par une pompe doseuse et ajouté en faible quantité par un dispositif spécial sur la bande de clinker alimentant le broyeur.

Plusieurs catégories d'agents de mouture sont disponibles selon les effets qu'ils sont capables de produire. Mais, en principe, Ils ont pour principale mission l'amélioration de la qualité du ciment et le rendement de l'opération de broyage, tout en combattant deux phénomènes contraignant le broyage qui sont: la ré-agglomération des ultrafines et l'enrobage des boulets.

Ces deux phénomènes sont dus aux forces électrostatiques et de Van Der Waals causées par les chocs boulet/boulet et boulet/blindage avec les particules. L'agglomération crée de grosses particules, ce qui influe négativement l'efficacité du broyeur et celle du

séparateur. Quant à l'enrobage, il se manifeste par la formation d'une fine couche autour des corps broyants. Il devient de plus en plus remarquable à haute température. A ce niveau, les agents de moutures agissent pour garder des surfaces propres de boulets et de blindage <sup>[9]</sup>.

En plus de ces deux effets, les agents de mouture permettent :

- L'augmentation de la résistance du ciment ;
- L'amélioration du débit des broyeurs ;
- La fluidité de la matière et donc facilité d'opération de silotage ;
- La diminution de l'usure des corps broyants ;
- L'augmentation de l'efficacité des séparateurs ;
- Le soulagement des filtres.

## **II. Mode opératoire**

L'étude a été faite sur deux adjuvants dont la composition est maintenue à l'état confidentiel pour des raisons économiques, ils sont ainsi dénommés adjuvant M et adjuvant G.

### **Préparation des échantillons :**

Les essais sont faits selon la démarche suivante :

- Préparation de la matière première (échantillonnage, concassage) ;
- Analyse chimique de la matière première ;
- Broyage de la matière tout en contrôlant, chaque 15 minutes, le refus à 80 $\mu$ m qui doit être égale à 2%.

Le produit obtenu est par la suite analysé pour vérifier sa compatibilité avec la qualité du ciment recherchée. Cette analyse concerne les paramètres suivants :

- Les refus R80 $\mu$ m et R45 $\mu$ m ;
- La surface spécifique de Blaine (SSB en cm<sup>2</sup>/g) qui correspond au le temps que met un volume d'air pour traverser une couche du liant tassé.
- SO<sub>3</sub> : se détermine par mesure de l'intensité des raies caractéristiques du spectre de fluorescence des rayons X.



- Perte au feu : Elle permet de déterminer le pourcentage de CO<sub>2</sub> dans le ciment ;
- La chaux libre CaO<sub>l</sub> : se calcule par solubilisation du ciment et dosage acido-basique.
- La résistance à la flexion et à la compression de 2 jours, 7 jours et 28 jours.

## 2.Détermination du dosage optimale

Pour déterminer le dosage optimal des deux adjuvants, nous avons fixé la composition de clinker, % calcaire ajout, et % gypse tout en changeant la quantité d'adjuvant introduite.

## 3.Détermination du gain en clinker

Dans cette phase de l'étude, nous allons fixer les dosages des deux adjuvants tout en diminuant le pourcentage du clinker dans l'alimentation.

Pour valider ces déductions nous avons procédé par des essais au niveau industriel qui montreront le gain apporté par l'utilisation des agents de mouture sur les deux plans : C/k et efficacité énergétique.

- **Description du broyeur d'essai**

Il s'agit d'un broyeur mono-chambre à boulets en acier coulé GS 52. La chambre de broyage est sous forme d'un ellipsoïde rotatif, de diamètre maximal de 600 mm, avec un couvercle rond de remplissage et un autre ovale de vidange.

## III.Expression des résultats des essais laboratoires

### 1. Détermination du dosage optimale

- Essai de l'adjuvant M:

**Tableau 25: Résultats des essais mécanique de l'adjuvant M**

Essais	Composition				Débit Adjuvant en (g/t)	ESSAIS MECANIQUES					
	Clinker (%)	Gypse (%)	Calcaire ajout (%)	CV (%)		Flexion (MPa)			Compression (MPa)		
						2j	7j	28j	2j	7j	28j
0 (Témoin)	67,7	5,00	20,00	0,00	0	3,9	5,7	6,9	7,9	17,4	26,1
1	67,7	5,00	20,00	0,00	200	4,6	5,9	7,8	8,9	19,6	33,4
2	67,7	5,00	20,00	0,00	250	4,7	6,0	8,1	9,6	20,7	34,00
3	67,7	5,00	20,00	0,00	300	4,6	6,4	7,9	11,1	24,2	37,2
4	67,7	5,00	20,00	0,00	350	5,0	6,5	8,1	13,2	25,8	38,6
5	67,7	5,00	20,00	0,00	400	4,4	5,9	7,8	8,8	20,4	36,1

On remarque que la résistance à la compression de 28j augmente avec l'augmentation du débit d'adjuvant M. En effet, sans introduction de l'agent de mouture la résistance était de 26,1 ; cette valeur à augmenter de 22% pour un débit de 350g/t. A partir de cette valeur de dosage d'adjuvant la résistance commence à diminuer.

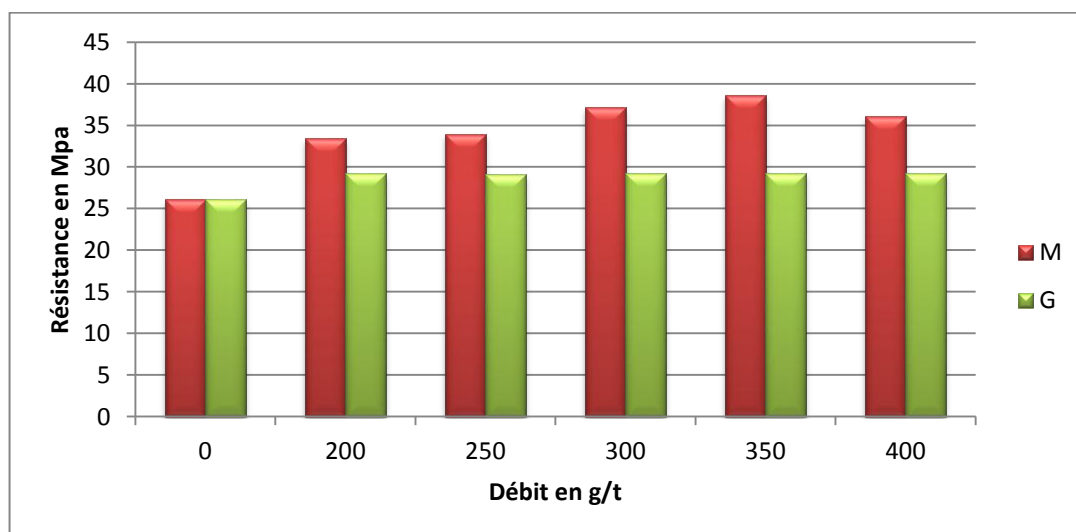
- Essai de l'adjuvant G:

**Tableau 26: Résultats des essais mécanique de l'adjuvant G**

Essais	Composition				Débit Adjuvant en (g/t)	ESSAIS MECANIQUES					
	Clinker (%)	Gypse (%)	Calcaire ajout (%)	CV (%)		Flexion (MPa)			Compression (MPa)		
						2j	7j	28j	2j	7j	28j
0 (Témoin)	67,7	4,5	24,7	0,00	0	3,9	5,7	6,9	7,9	17,4	26,1
1	67,7	4,5	24,7	0,00	200	4,10	4,70	6,50	8,6	17,95	29,2
2	67,7	4,5	24,7	0,00	250	4,12	4,40	6,40	6,20	15,70	29,13
3	67,7	4,5	24,7	0,00	300	3,80	4,00	6,70	6,50	16,90	29,3
4	67,7	4,5	24,7	0,00	350	3,70	4,50	6,70	7,20	18,00	29,3
5	67,7	4,5	24,7	0,00	400	3,80	4,90	6,95	8,67	19,30	29,3

On remarque que la résistance évolue avec le débit d'adjuvant. Or cette évolution connaît des fluctuations. En effet, à 200g/t d'adjuvant la résistance à atteint 29,2MPa, alors que l'augmentation de ce débit de 50g/t engendre la diminution de la résistance qui, à partir de 300 g/t, connaît une stagnation avec une valeur de 29,3MPa.

La comparaison de l'effet des deux adjuvants M et G est illustrée sur le graphe ci-dessous :



**Figure 22: variation de R28j en fonction du débit des deux adjuvants**

La contribution des deux adjuvants à l'amélioration de la résistance du ciment n'est pas similaire et l'adjuvant M s'avère le plus puissant avec un débit optimal de 350 g/t. Quant à l'adjuvant G le débit optimal correspond à 200g/t.

## 2. Détermination du gain en clinker

Pour un débit de 350 g/t d'adjuvant M et de 200g/t d'adjuvant G, On trouve les résultats suivants :

**Tableau 27: Résultats des essais mécaniques par rapport au débit optimal des deux adjuvants**

Essais	Composition				ESSAIS MECANQUES					
	Clinker (%)	Gypse	Calcaire ajout (%)	CV (%)	Flexion (MPa)			Compression (MPa)		
					2j	7j	28j	2j	7j	28j
0 (Témoin)	67,7	4,5	24,7	0,00	4,0	6,2	7,7	18,3	31,1	40,6
Adjuvant M	65	4,5	30,2	0,00	4,7	6	7,8	23,2	36,3	46,2
Adjuvant M	63	4,5	32	0,00	4,9	6,2	7,9	20,9	33,5	45,1
Adjuvant G	65	4,5	30,2	0,00	4,2	5,8	7,5	18,9	32,1	41,1
Adjuvant G	63	4,5	32	0,00	3,6	5,4	7,2	13,7	30,6	39

On remarque, pour l'adjuvant M, que malgré la diminution du taux du clinker à 63%, la valeur de la résistance est de 31,8MPa qui est toujours dans l'intervalle recommandé(>25 MPa). Or, pour l'adjuvant G, la diminution du pourcentage du clinker de 4 points décroît la résistance au-dessous de la valeur déclarée par la cimenterie. En revanche, avec un pourcentage du clinker de 65% ; l'adjuvant G donne une valeur acceptable de la résistance.

## 3. Choix du type d'adjuvant

L'adjuvant le plus efficace d'après les résultats mécanique l'adjuvant M, c'est donc le type de l'adjuvant quand va utiliser dans lors des essais industrielle.

**Tableau 28: Résultats des résistances sans et avec adjuvant M**

	<b>CPJ 35 sans adjuvant</b>	<b>CPJ 35 avec adjuvant</b>
<b>Résistance à la compression 2 jours (MPa)</b>	7,9	9,8
<b>Résistance à la compression 7 jours (MPa)</b>	17,4	19,9
<b>Résistance à la compression 28 jours (MPa)</b>	26,1	31,8

On remarque très bien l'influence de l'adjuvant M sur la résistance du ciment, en effet, à 7 jours, la résistance s'est améliorée de 14,5% et à 28 jours de 15%.

En plus de ces effets, l'adjuvant M permet de combattre le phénomène d'enrobage des boulets (figure ci-dessous)



**Figure 23: Effet de l'adjuvant sur les boulets**

## **IV. Essais industriels de l'adjuvant M**

### **IV-1. Résultats de l'essai industriel**

Après avoir déterminé le type et la quantité d'adjuvant à utiliser pour le CPJ 35. On a effectué des essais industriels durant le mois de Mai. Les résultats obtenus, en comparaison avec les performances de l'atelier et la qualité du ciment sans adjuvant. Pour l'essai sans adjuvant nous avons pris les valeurs obtenues lors de la période de l'audit énergétique de l'atelier du broyage.

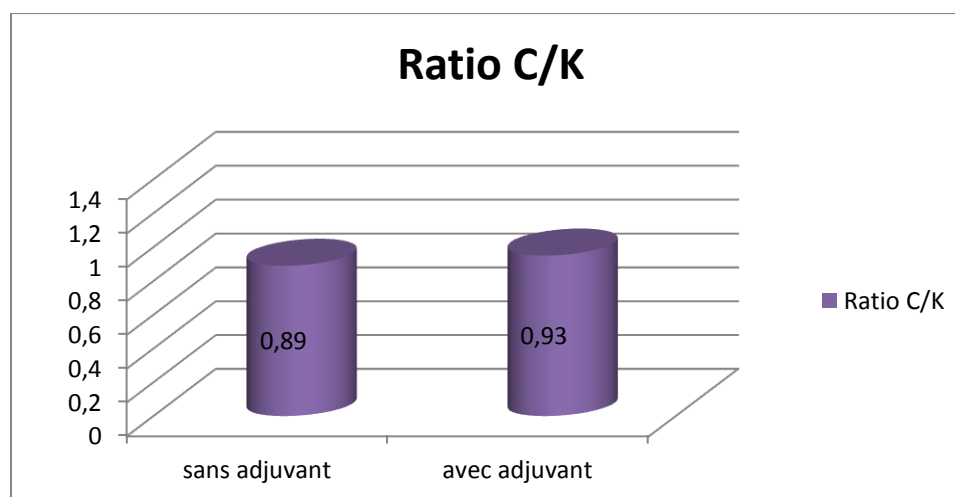
**Tableau 29: Essais industriels de l'adjuvant M**

	<b>Sans adjuvant</b>	<b>Avec adjuvant</b>
<b>% clinker</b>	67,7	64,52
<b>% gypse</b>	4,5	4,7
<b>% calcaire</b>	24,7	32
<b>SO3 moyen</b>	2,7	2,9
<b>Refus sur 80µm</b>	2,3	3,01
<b>Refus sur 45µm</b>	19	20.14
<b>Résistance à la compression 2 jours (MPa)</b>	7,9	9
<b>Résistance à la compression 7 jours (MPa)</b>	17,4	19,5
<b>Résistance à la compression 28 jours (MPa)</b>	26,1	32
<b>Consommation électrique KWh/t</b>	29,9	27,4

Ces résultats notent bien l'effet de l'ajout de l'agent de mouture sur la marche du broyeur. En effet, l'ajout de 350g/t de l'adjuvant M a permis de gagner 4% du clinker. En plus de cela.

## 2. Le rapport C/k :

L'impact de l'adjuvant M sur le ratio C/k est significatif (figure ci-dessous)



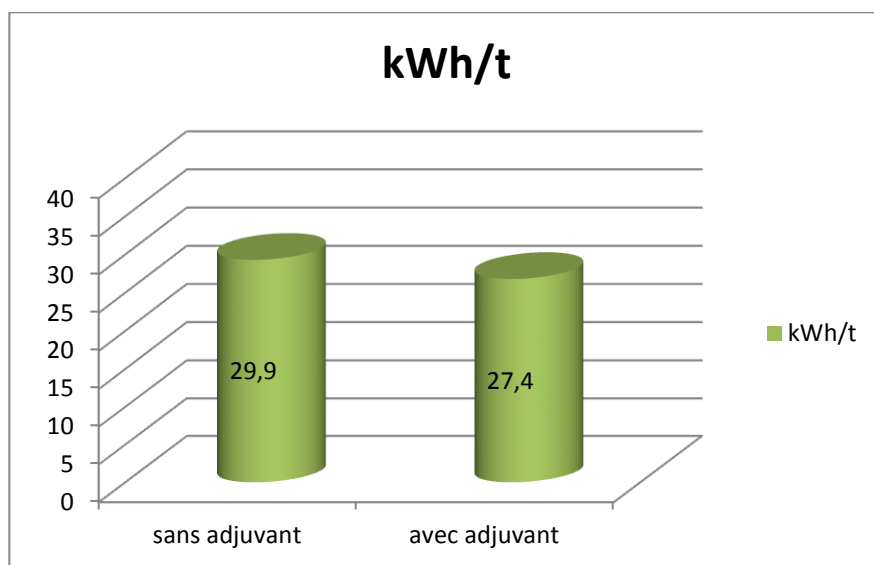
**Figure 24: Amélioration du rapport C/K**

En effet, le rapport C/k s'est amélioré d'environ 4,5%. Ce qui correspond à un gain de 4% en clinker.

## 3. La consommation énergétique spécifique (KWh/t) :

L'introduction des agents de mouture dans le processus de fabrication du ciment a permis de réduire la consommation énergétique de l'atelier de broyage, notamment celle du broyeur

que nous allons comptabiliser dans notre cas.



**Figure 25: Amélioration de la consommation électrique**

La consommation énergétique pendant la période d'essai de l'adjuvant dans le broyeur a présenté une diminution de 8% par rapport à la période de marche sans adjuvant. Le gain est comptabilisé par rapport au KWh consommé par le broyeur seul pour chaque tonne du ciment

## VIII. Evaluation économique

L'ajout des agents de mouture nous a permis de gagner 5% du clinker. En effet, les essais industriels effectués avec seulement 63% du clinker ont donné des résultats très importants. De même pour la consommation énergétique. Nous évaluerons, donc, le gain lié à la réduction de l'incorporation du clinker et à l'amélioration de l'efficacité énergétique.

**Tableau 30: Gain porté par la réduction du clinker**

	Sans adjuvant	Avec adjuvant
<b>Production annuelle t</b>	530000	
<b>Consommation clinker t/an</b>	593052	565195,2
<b>Consommation adjuvant t/an</b>	0	127
<b>Prix de clinker en DH/t</b>	400	
<b>Prix de l'adjuvant M en DH/t</b>	16000	
<b>Coût clinker MDH/an</b>	150	145,04
<b>Coût adjuvant MDH/an</b>	-	2,032
<b>Coût annuel MDH</b>	150	147,072
<b>Gain annuel MDH</b>	3	

## **Gain indirect**

L'introduction des agents de mouture lors du broyage du clinker permet en plus de l'amélioration du ratio C/K et du KWh/t des gains indirects qui consistent en :

- Augmenter la disponibilité de l'unité de broyage par diminution de taux d'usure des boulets;
- Augmenter l'efficacité des chocs par élimination de phénomène d'enrobage des boulets ;
- La réduction des émissions en CO<sub>2</sub> par atténuation du taux d'incorporation du clinker dans la production du ciment, en effet, des études ont montré que chaque tonne du clinker produite conduit à l'émission de 820 kg de CO<sub>2</sub>. La diminution de taux d'incorporation du clinker dans la fabrication du ciment diminue les émissions du CO<sub>2</sub> d'environ 3%.
- Facilitation de silotage du ciment par élimination du phénomène d'agglomération des particules.

## **Conclusion**

Pour améliorer les performances de l'atelier de broyage, notamment le ratio C /k et l'efficacité énergétique, nous avons mené une série d'essais qui a pour but l'étude de possibilité d'atténuation de l'incorporation du clinker alimentant le broyeur et ce via utilisation de deux agents de mouture M et G. L'analyse des résultats ainsi que l'étude économique a conclu que l'adjuvant M est beaucoup plus rentable avec un débit optimal de 350g/t et un taux d'incorporation du clinker de 63%.

Les essais industriels de l'adjuvant choisi a montré que celui-ci permet de :

- Diminuer le pourcentage du clinker incorporé de **4%** ;
- Améliorer le rapport C/k de **4,5%** ;

Diminuer la consommation énergétique du broyeur de **8%** ;

Ce qui correspond à un gain annuel de 4 **MDH** en termes de consommation du clinker et d'efficacité énergétique.

# Conclusion générale

Ce stage que nous avons effectué à Asment TEMARA, nous a offert l'occasion d'investir nos connaissances acquises durant notre formation académique, d'apprécier le travail en équipe, de suivre de très près le travail d'ingénieurs en génie industriel lors des travaux exécutés au sein du service.

De plus, ce stage nous a permis de connaître les différentes étapes de la production du ciment ainsi que les installations nécessaires pour ce type de fabrication. Aussi, nous avons pu suivre les étapes du déroulement d'un projet, et vivre sur le terrain les problèmes que les ingénieurs rencontrent pendant la réalisation des projets.

Au terme de ce travail, nous avons pu atteindre des résultats très importants portés par l'audit énergétique et l'étude de l'impact des agents de mouture sur l'efficacité énergétique de l'atelier de broyage BK1. En effet, l'audit de l'atelier de broyage nous a permis de :

- Caractériser la marche de l'atelier et de la dynamique de la matière;
- Evaluer les performances des équipements critiques de l'atelier ;
- Mettre en évidence des propositions d'amélioration de l'atelier visant à abaisser sa consommation énergétique tout en augmentant le débit de production.

Ainsi, les résultats suivants ont été conclus :

- Présence importante d'air faux dans l'atelier, en particulier dans le broyeur ;
- La sollicitation intense des parties internes du broyeur ;
- Colmatage des manches filtrantes.

A la base de ces déductions nous avons proposé des actions d'amélioration pour remédier à ces dysfonctionnements.

Concernant l'étude de l'impact des agents de mouture sur le broyage, la série d'essai que nous avons menée a permis une amélioration importante de la résistance du ciment et donc la réduction du taux de clinker alimentant le broyeur. Les essais industriels effectués pour l'adjuvant choisi ont renforcé ce fait consommation énergétique diminuée de 8%.



# Résumé

Le projet de fin d'études présenté, s'inscrit dans le cadre de la contribution à l'amélioration de l'efficacité énergétique de l'atelier de broyage ciment BK1 de l'usine d'Asment TEMARA « groupe VOTORANTIM »

L'objectif précis de notre travail est de proposer des recommandations afin de minimiser la consommation énergétique et d'améliorer la production.

Notre mission s'est déroulée en deux étapes :

- La première étape est consacrée dans un premier temps à la collecte des informations relatives à la visualisation de fonctionnement actuel de l'atelier de broyage à travers les données techniques des équipements de cet atelier ainsi que les données statistiques qui ont permis effectivement de suivre l'évolution de la consommation spécifique. Dans un second temps, l'analyse de ces données nous ont permis d'identifier les équipements majeurs et les plus consommateur de l'énergie.
- La deuxième étape est réservée au diagnostic de fonctionnement de l'atelier BK1 afin de détecter ses différentes anomalies démarche à travers l'audit énergétique. Après avoir évalué les performances de l'atelier, nous avons proposé dans un second temps des recommandations pour améliorer sa consommation et assurer sa bonne marche.

Les résultats obtenus ont permis effectivement de suivre l'évolution de la consommation spécifique.

Il est important de noter que, dans cette étude on s'est focalisé sur l'utilisation des Agents de Moutures comme alternative d'amélioration des performances du broyage. Cette approche s'est basée sur une série d'essais ayant pour but la détermination du type et du dosage d'adjuvant à introduire, ainsi que l'élaboration et validation d'une corrélation entre résistance, pourcentage du clinker et dosage d'adjuvant. Les spécifications et propriété de l'agent de mouture élaborées à l'échelle laboratoire ont été utilisées d'une façon satisfaisante à échelle industrielle donnant des résultats très intéressants notamment une diminution du taux d'incorporation du clinker de 3% qui s'est traduite par l'amélioration du ratio C/K de

4,5% et une diminution de la consommation électrique de 8% ce qui s'est traduite par un gain annuel de 4MDH.

## **Abstract**

The graduation project presented, be part of the contribution to the improvement of energy efficiency of the mill cement grinding plant « Asment TEMARA » « VOTORANTIM group »

The specific objective of our work is to propose recommendations to minimize energy consumption and improve production.

Our mission was carried out in two steps:

- The first step is devoted initially to collect information on viewing current operation of the grinding plant through the technical data of equipment as well as statistical data that has actually helped follow the changes in the specific consumption. Secondly, the analysis of these data allowed us to identify the major equipment and most consumer of energy.
- The second step is for the diagnosis of the grinding plant to detect its various anomalies walking through the energy audit. After evaluating the grinding plant performance, we have proposed in a second time some recommendations to improve the consumption and ensure its proper functioning. This results allowed to follow the specific consumption.

It is important to note that in this study we focused on the use of grinding aids as an alternative to improving the performance of grinding. This approach is based on a serie of tests that aims to determine the type and dosage of adjuvant to be introduced, and the development and validation of a correlation between resistance, percentage of clinker and dosing of adjuvant. Specifications and property of the grinding aids developed at the laboratory scale have been used satisfactorily on an industrial scale giving very interesting results: a decrease in the incorporation rate of 4% of the clinker resulting by improving the ratio C / K of 4,5% and a reduction of the power consumption of 8% which resulted in an annual gain of 4MDH.

# **ANNEXES**

# Annexe 1

## Méthodologie et calcul du bilan aéraulique

### 1-Appareils utilisés pour les différentes mesures

Afin d'établir le bilan aéraulique de l'atelier BK1, il est nécessaire de faire des mesures de T°C, de pressions statique et dynamique à chaque point de mesure, l'outillage utilisé pour ces mesures est :

#### a- Tube de Pitot

Le tube de Pitot est un dispositif simple permettant de mesurer la vitesse de l'écoulement d'un fluide par la mesure de la pression dynamique exercé par son mouvement, il est constitué de deux tubes coudés concentriques dont les orifices, en communication avec le fluide dont on veut mesurer la vitesse, sont disposés de façon particulière :

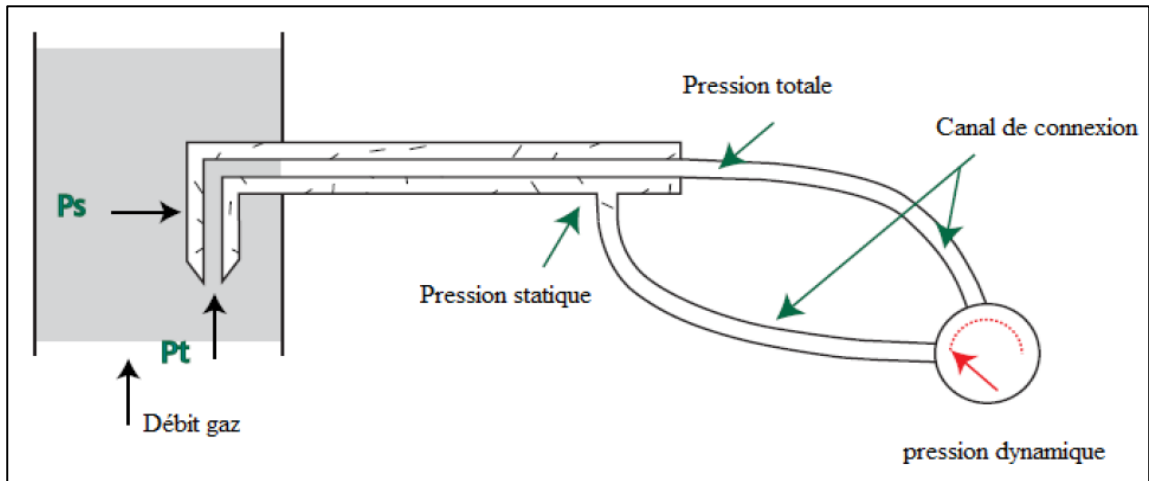
- Le tube extérieur s'ouvre perpendiculairement à l'écoulement du fluide. La pression à l'intérieur de ce tube est donc égale à la pression ambiante ou pression statique ;
- Le tube intérieur est parallèle à l'écoulement du fluide, et est ouvert en son bout, face au flux. La pression à l'intérieur de celui-ci est la pression totale.



**Figure 26 : image de tube de Pitot utilisé dans la mesure de la pression dynamique de l'air**

#### ✓ Procédure de mesure

Dans chaque point de mesure (entrée broyeur, sortie broyeur, cheminée, entrée filtre broyeur...) on mesure la pression dynamique à l'aide de tube de Pitot en faisant entrer le tube perpendiculairement au flux d'air dans chaque ouverture de circuit, l'appareil liée au tube affiche directement la valeur de la pression dynamique.



**Figure 27 : schéma montrant la méthode de détermination de la pression dynamique à l'aide d'un tube de Pitot**

En effet la mesure de pression dynamique nous permet de déterminer les vitesses des flux d'air en utilisant le théorème de Bernoulli exprimé comme suit :

$$P_s + \rho g z + \frac{1}{2} \rho V^2 = P_t$$

On effectue les mesures pour la même altitude  $z$  d'où :

$$P_t - P_s = P_d = \frac{1}{2} \rho V^2$$

Et par conséquent :

$$V = \sqrt{\left(\frac{2P_d}{\rho}\right)}$$

Après le calcul de la vitesse on déduit le débit aéraulique :

$$Q = V * S$$

Avec  $Q$  : le débit aéraulique (en  $Nm^3/h$ ).

$V$  : la vitesse de l'air (en  $m/s$ ).

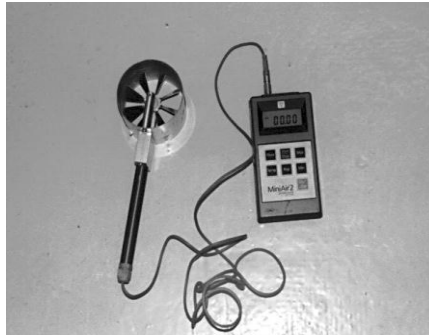
$S$  : La section de la conduite cylindrique (en  $m^2$ ).

### b- Thermomètre à thermocouple

C'est un appareil qui mesure et affiche la température. La mesure des températures dans chaque points de l'atelier broyage est nécessaire pour calculer le coefficient qui nous permet de convertir les grandeurs calculés en unité de normal mètre cube, en ajoutant qu'elle permet de calculer les quantités de chaleur dans le bilan thermique.

### c- Anémomètre

C'est un appareil permettant de mesurer la vitesse de l'air. Les mesures à l'anémomètre se font sur des sections dites "ouvertes" tel que pavillon de ventilateur, entrée d'air frais au broyeur, etc..



**Figure 28: image de l'appareil anémomètre**

### d- Manomètre

Un manomètre est un instrument servant à mesurer la pression.

Lors de l'audit, la pression statique est mesurée directement par le manomètre.

## 2-Préparation des fiches de calcul

Pour faire le bilan aéraulique, il est nécessaire de préparer auparavant une fiche de calcul dans laquelle on a tous les paramètres qu'on a mesuré à chaque point de mesure pour déterminer les débits d'air.

Les résultats sont présentés dans le tableau 31.

Tableau 31:fiche de calcul du bilan aéraulique

pts de mesure	T (°C)	P. s (mmCE)	Diamètre (mm)	P. atm (mmHg)	Coef. pitot	Densité (kg/Nm <sup>3</sup> )	f <sub>efect/standard</sub>	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Pd (mmCE)	Vitesse (m/s)	Qef (m <sup>3</sup> /h)	Qst (Nm <sup>3</sup> /h)
1	24	0	740	760	0,84	1,29	0,92	1,19	0,81	1,17	1810	1664
2	81	-88	740	760	0,84	1,29	0,76	0,99	87,40	13,31	20600	15752
3	79	-1	740	760	0,84	1,29	0,78	1,00	110,49	14,86	23000	17836
4	21	0	2126250	760	0,84	1,29	0,93	1,20	0,30	0,71	9020	8376
5	76	-34	1395	760	0,84	1,29	0,78	1,01	2,98	2,43	13390	10440
6	24	0	2126250	760	0,84	1,29	0,92	1,19	0,05	0,30	3890	3576
7	74	-33	20000	760	0,84	1,29	0,78	1,01	0,01	0,12	137800	108070
8	82	-211	1800	760	0,84	1,29	0,75	0,97	133,39	16,57	151700	114295
9	80	-334	1800	760	0,84	1,29	0,75	0,97	143,59	17,25	157900	118198
10	84	-39	1800	760	0,84	1,29	0,76	0,98	141,18	16,95	155200	118238
11	84	0	1800	760	0,84	1,29	0,76	0,99	4,88	3,15	28800	22024

## Annexe2

### La production du broyeur BK1

Les erreurs des doseurs ont été vérifiées avant et après le processus d'audit, en faisant la comparaison entre le poids de la matière chargée dans le camion et l'indication du compteur. D'après les résultats, l'erreur du doseur de calcaire est légèrement élevée. Ces erreurs sont prises en considération lors de la détermination de la production totale.

Lors de l'audit, la lecture des compteurs de l'alimentation et les compteurs électriques est aussi prise, tous les résultats sont présentés dans le tableau 32.

**Tableau 32 : la production du broyeur ciment BK1**

	CLINKER	GYPSE	CALCAIRE	CENDRES VOLANTES	TOTAL
Compteur Initial(t)	3 893,00	24 149,00	1 608,00	105 800,00	----
Compteur final(t)	5 444,00	24 254,00	2 253,00	105 917,00	----
Compteur total	1 551,00	105,00	645,00	117,00	----
Débit doseur	67,4	4,6	28,0	5,1	105,1
Erreur (%)	-0,40	0,00	+7,04	0,00	----
Total base humide (t/h)	67,7	4,6	26,1	5,1	103,4
Humidité (%)	0,00	1,36	5,09	0,27	1,36
<b>Base sèche total (t/h)</b>	67,7	4,5	24,7	5,1	<b>102,0</b>



## Annexe3

### L'analyse granulométrique

Le tamisage consiste à diviser un matériau en le faisant passer à travers plusieurs tamis. On appellera tamisat le poids du matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis. Le matériau étudié est entre en vibration à l'aide de la tamiseuse électrique.

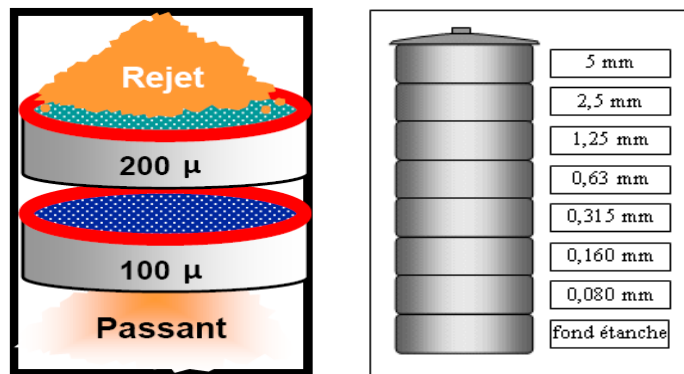


Figure 29 : A gauche : Exemple de passant et de rejets, à droite: la colonne de tamis

Les résultats de l'analyse granulométrique sont présentés dans le tableau 33.

Tableau 33:Alimentation du broyeur – analyses pour différentes mailles

Maille (mm)	Clinker (%)	Gypse (%)	Calcaire (%)	Cendres volantes (%)	Alimentation totale (vers le circuit) (%)
40,00	0,0	0,0	2,4	0,0	0,6
20,00	12,6	11,3	10,5	0,0	11,8
10,00	36,6	23,1	20,3	0,0	31,1
5,00	54,2	37,6	30,1	0,0	46,3
2,5	64,1	50,3	41,2	0,0	56,4
1,25	71,0	62,0	53,7	0,0	64,9
0,630	76,6	71,0	66,6	0,1	72,5
0,315	86,4	79,5	81,5	1,1	83,4
0,212	89,3	83,2	86,3	3,6	86,9
0,090	94,4	90,4	96,2	13,3	93,8
0,063	96,6	93,3	97,5	20,5	96,1
0,045	97,9	95,5	98,2	27,3	97,6
% base humide	65,5	4,4	25,2	4,9	100,0
% base sèche	66,4	4,4	20,3	5,0	100,0
Humidité (%)	0,00	1,36	5,09	0,27	1,36

## Annexe 4

### Mesure du degré de remplissage

La mesure du taux de remplissage d'un broyeur à boulets est essentielle pour maintenir la puissance absorbée et par conséquent la production du broyeur.

Le moyen le plus commun pour évaluer le degré de remplissage est la mesure de la hauteur libre à l'intérieur du broyeur (distance verticale entre le haut de la charge et le blindage dans l'axe du broyeur). Voir figure 31

Normalement, il est préférable de prendre la hauteur en 3 points (entrée de la chambre, milieu de la chambre et à la sortie de la chambre) et calculer la moyenne.

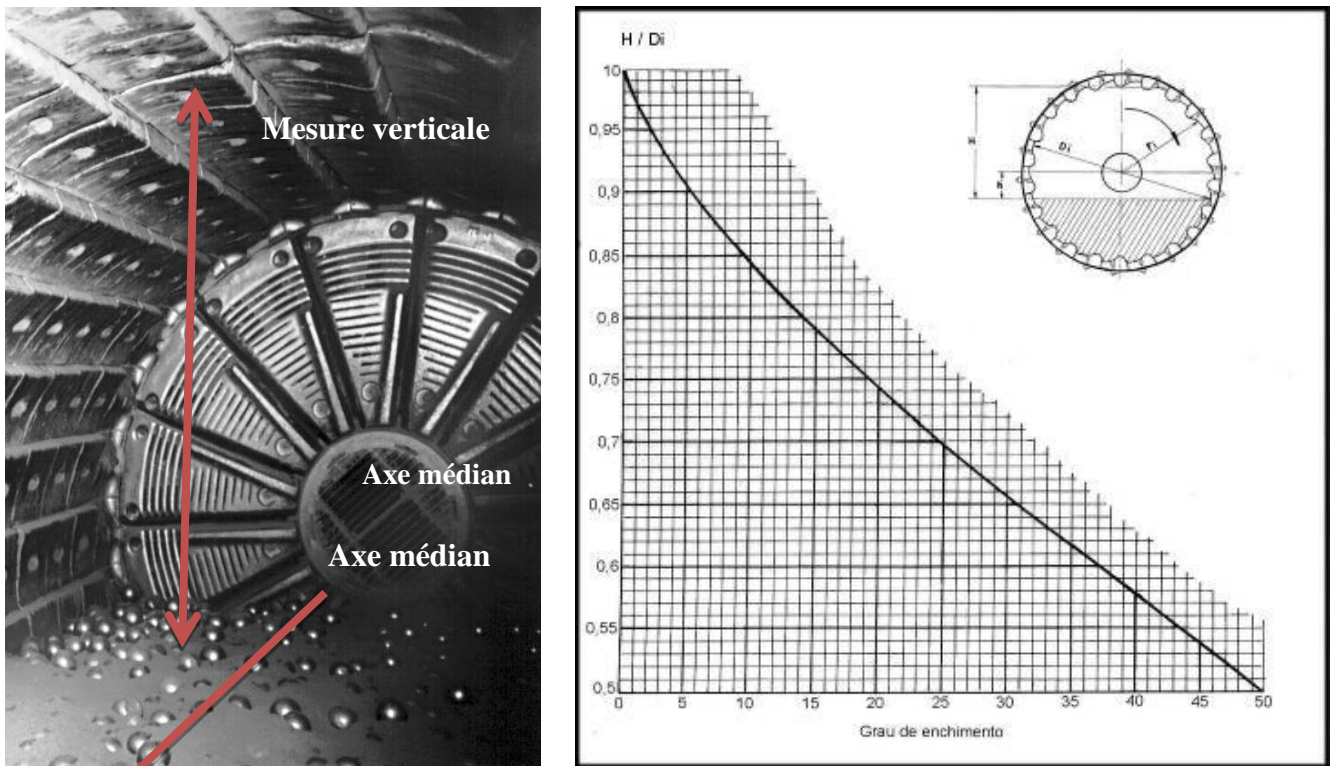


Figure 30: Détermination du taux de remplissage

Le rapport entre la hauteur vide et le diamètre du broyeur donne directement le pourcentage du taux de remplissage en faisant l'intersection de ce rapport avec la courbe de taux de remplissage schématisée dans la figure ci-dessus.

# Annexe 5

## Les analyses chimiques

### I. Laboratoire d'Asment Temara

Les mesures des paramètres de contrôle de qualité du ciment sont assurées par trois types d'essais : essais chimiques, physiques et mécaniques.

Avant toute analyse de la matière, il faut passer par une étape très importante ; c'est l'échantillonnage qui comprend deux types d'échantillonnage : automatique et manuel destiné à la :

- Détermination de l'humidité.
- Analyse chimique et physique.

#### 1- Les analyses chimiques

##### a. Détermination du taux d'humidité

Cette analyse est faite afin de déterminer la quantité d'eau.

- Mode opératoire

Soit M la masse de l'échantillon humide prélevé.

On a :  $P_1 = M + T$  (T = la Tare).

Soit  $P_2$  = poids après séchage.

Donc

$$\% \text{Humidité} = [(P_1 - P_2) / M] \times 100$$

##### b. Perte au feu

- But de la perte au feu :

Elle permet de déterminer le pourcentage de  $\text{CO}_2$  dans des matières premières.

Le principe consiste en la décomposition des carbonates de calcium  $\text{CaCO}_3$  à haute température selon la réaction suivante:  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

- Mode opératoire :

Peser 1 g de la matière à analyser, la mettre dans un creuset en platine puis peser l'ensemble ( $m_1$ ), puis mettre le creuset dans le four à  $990^\circ\text{C}$  pendant 30 min. Ensuite refroidir

le creuset dans le dessiccateur à silicate de gel puis le peser ( $m_2$ ).

Soit  $m_1$ : la masse du creuset contenant 2g de la matière avant la calcination.

$m_2$ : la masse de la matière après la calcination

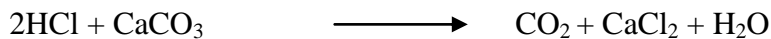
Pour calculer la perte au feu de la matière, on utilise la formule suivante :

$$\% \text{ P.F} = (m_1 - m_2) \cdot 100$$

### c. Détermination du taux d'ajout :

➤ But :

Elle consiste à calculer le taux de calcaire ajout (calcaire de correction) dans le ciment à partir de la quantité de  $\text{CO}_2$  dégagé lors de la réaction :



➤ Mode opératoire :

- ➔ Peser 1 g de ciment.
- ➔ Le mettre dans un flacon contenant quelques gouttes d'eau distillée.
- ➔ Introduire soigneusement 10ml d'HCl dilué à 50% ( $d=1,19$ ) contenu dans un tube à essai.
- ➔ Fermer le flacon et régler le zéro du calcimètre et fermer son robinet.
- ➔ Renverser le contenu du tube et bien agiter.
- ➔ Laisser refroidir pendant 3 à 4min par un jet d'eau.
- ➔ Lire le volume  $V$  de  $\text{CO}_2$ .

$$\text{Le taux d'ajout en calcaire} = V \times 0,56$$

### d. Dosage de la chaux libre

➤ But

La valeur de la chaux libre trouvée nous permet de savoir si le clinker est cuit ou non.

➤ Mode opératoire

- Introduire 1g de la matière broyée dans un erlenmeyer déjà séché.
- Mettre cet erlenmeyer sur un bain de sable.

- Ajouter 5ml de glycérine, chauffer puis retirer.
- Ajouter 25ml d'éthanol et quelques gouttes de phénol phtaléine. (Pour condenser l'alcool, il faut fermer l'erenmeyer avec un bouchon muni d'une tige en verre).
- Placer une deuxième fois l'erenmeyer sur le bain de sable jusqu'à avoir une coloration rose.

Enfin titrer la chaux dissoute par une solution de l'acide benzoïque (0.01M)



Soit Tb : tombée de burette.

Coeff. : Coefficient de l'acétate d'ammonium.

$\% \text{ Cao libre} = \text{Tb} * \text{coefficient}$
---

#### e. Analyse complète par fluorescence X

La méthode de fluorescence X constitue le moyen le plus précis pour les analyses qualitatives et quantitatives des éléments chimiques habituellement présents dans les ciments.

Principe

Mesure de l'intensité de raies caractéristiques du spectre de fluorescence des rayons X produit par les éléments à doser.

Pour atténuer l'influence des effets liés à la minéralogie ; à la granulométrie et aux interactions possibles entre les éléments présents, l'échantillon est dilué par fusion dans un mélange fondant de composition appropriée.

L'analyse peut être effectuée sur pastille à condition qu'il puisse être prouvé que cette dernière donne des résultats satisfaisants par rapport à l'analyse effectuée sur perles.

- Préparation des perles :

M (à peser) = 1g de la matière + 5g de tétra Borate de Lithium (fondant).

On refait le même mode opératoire de l'analyse chimique Perte au Feu.

- Homogénéisation

Le mélange intime des constituants en poudre(ciment et mélange fondant) est réalisé par action mécanique.

- Fusion

Le mélange homogénéisé est disposé dans le creuset de fusion et amené jusqu'à fusion complète suivant un processus bien défini. Une agitation périodique du creuset permet d'homogénéiser le liquide formé.

- Moulage et refroidissement

La masse fondue est coulée dans le moule.

Le verre obtenu est refroidi jusqu'à ce que la perle se détache du moule puis la perle démoulée est laissée jusqu'à équilibre avec la température ambiante.

- Analyse par spectrométrie de fluorescence des rayons X

L'analyse quantitative consiste à mesurer pour tout élément  $E_i$  de concentration  $C_i$  l'intensité  $I_{\lambda,i}$ , d'une raie de fluorescence donnée.

Dans le cas général  $I_{\lambda,i}$  est lié à  $C_i$  par la relation

$$I_{\lambda,i} = \frac{k C_i}{K + (1-K)C_i}$$

La fluorescence de rayons X est un phénomène qui se produit lorsqu'un matériau est exposé à des rayons X. Si l'énergie est suffisamment élevée, un électron du noyau est éjecté de son orbitale atomique. Un électron d'une orbite extérieure se déplace dans l'espace vide et sur son chemin libère de l'énergie appelée fluorescence détectable.

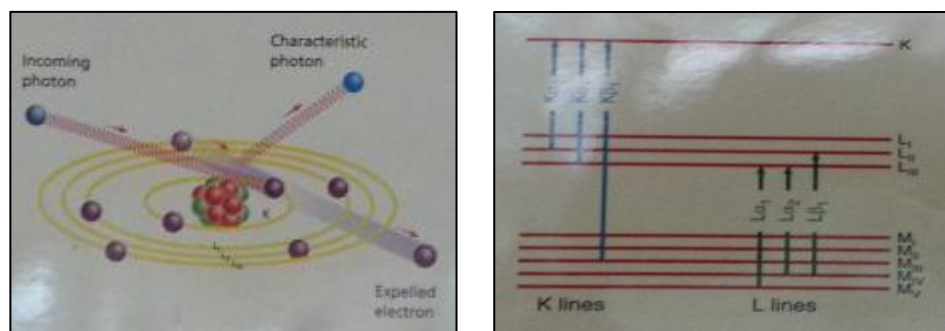


Figure 31: spectre de fluorescence X

➤ Mode opératoire

-Préparation des pastilles : 11g de l'échantillon + 1g celluloses.

L'échantillon doit être introduit dans l'appareil sous forme d'une perle ou d'une pastille.

-Les pastilles sont préparées à l'aide d'une presse semi-automatique avec une traverse supérieure pivotante.

Quant aux perles, elles sont préparées à l'aide d'une parleuse PERL'X4.

## 2- Les essais physiques et mécaniques

### a. Détermination des refus :

Les essais de la granulométrie consistent à passer la matière dans des tamis de différents diamètres (43, 60, 80, 90, et 100 microns).

$$\% \text{Refus} = \text{Masse de refus} \times 100 / \text{masse initiale}$$

### b. La résistance à la flexion de compression

Cette analyse commence par la réalisation des éprouvettes prismatique:

-L'appareil malaxeur nous permet d'avoir le mortier.

-L'appareil à choc est destiné à la confection des éprouvettes prismatiques, il nous permet de tasser le ciment et d'éliminer les bulles d'air. On range ces éprouvettes dans l'armoire humide à 20°C, le lendemain on retire les éprouvettes du réfrigérateur et on les place dans un bain d'eau, en suite on détermine leurs résistances (2-7-28 jours).

- **Résistance à la flexion :** cette résistance est déterminée à l'aide d'un appareil de flexion, on attend la rupture de l'éprouvette et on prélève la valeur en Newton.
- **Résistance de compression :** elle a pour but la détermination des résistances à compression des demis éprouvette après la rupture à la flexion.

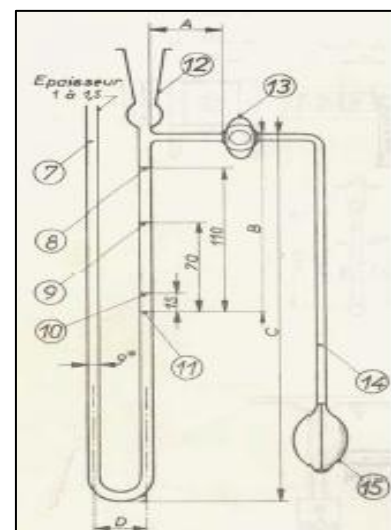
### c. Détermination de la surface spécifique Blaine

La surface spécifique du liant se calcule en fonction du temps que met un volume d'air constant, sous une pression déterminée et à température connue, à traverser une couche du liant dans des conditions définies.

-Peser à 2,6569g de l'échantillon, puis placer la grille au fond de la cellule, appliquer sur cette grille au moyen d'une tige.

-Aspirer lentement au moyen de la poire du tube jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le trait supérieur (8). Fermer le robinet et mettre en marche le chronomètre au cinquième de seconde quand le niveau du liquide atteint le deuxième trait (10). Noter le temps écoulé ainsi que la température de la pièce.

-Lire le temps dans un tableau pour avoir directement la valeur de la SSB.



### 3- Les résultats des analyses chimiques

**Tableau34: Les résultats des analyses chimiques de produit fini**

Ciment produit-CPG35		
paramètre	Laboratoire centrale	Laboratoire Temara
PEF (%)	9,86	10,38
SO3 (%)	2,59	2,75
CaO libre (%)	1,67	1,40
Poids spécifique (g/cm <sup>3</sup> )	2,95	--
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3440	3190
Résidu à 90µm (%)	4,0	--
Résidu à 80µm (%)	5,4	6,2
Résidu à 63µm (%)	13,6	13,6
Résidu à 45µm (%)	26,6	--
Temps de prise initial (min)	185	145
Temps de prise final (min)	265	270
Résistance à 2 jours (MPa)	7,9	9,2
Résistance à 7 jours (MPa)	17,4	19,3
Résistance à 28 jours (MPa)	26,1	30,2

**Tableau35: Distribution de la taille d'alimentation**

	clinker	gypse	calcaire	Cendres volantes	alimentation
d <sub>80</sub> (mm)	16,9	12,6	10,3	0,1	16,0
d <sub>50</sub> (mm)	6,2	2,6	1,6	----	4,3
d <sub>20</sub> (mm)	0,5	0,3	0,3	----	0,5



**Tableau36: Taille de distribution (%)**

	R <sub>212μm</sub>	R <sub>90μm</sub>	R <sub>63μm</sub>	R <sub>45μm</sub>
Alimentation séparateur	8,1	32,7	50,2	61,2
Rejet séparateur	19,3	70,5	90,4	96,1
Produit fini	0,2	3,5	12,5	26,6

**Tableau 37: Résultats d'analyse complète par fluorescence X de chaque matière première**

	Clinker (avec PEF)	gypse	calcaire	Cendres volantes
Humidité(Temara)(%)	0,00	1,40	5,10	0,30
PEF (%)	0,37	23,21	35,71	8,33
SiO <sub>2</sub> (%)	21,13	3,88	15,01	51,74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5,51	0,81	1,15	24,57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3,51	0,48	1,62	5,45
CaO (%)	64,11	31,74	44,93	3,63
MgO (%)	1,82	2,14	0,55	1,31
SO <sub>3</sub> (%)	1,48	36,88	0,14	0,03
K <sub>2</sub> O (%)	0,90	0,16	0,17	1,96
Na <sub>2</sub> O (%)	0,20	0,14	0,004	0,54
Ti <sub>2</sub> O (%)	0,25	0,10	0,25	0,53
P <sup>2</sup> O <sup>5</sup> (%)	0,38	0,02	0,38	1,27
SrO (%)	0,05	0,08	0,05	0,04
MnO (%)	0,06	0,00	0,06	0,47
Cl <sup>-</sup> (%)	0,008	0,005	0,006	0,003
S <sup>-2</sup> (%)	--	--	--	--
H <sub>2</sub> O cristallisé (%)	--	--	--	--
LSF	--	90,60	--	--
SM	--	2,34	--	--
AM	--	1,57	--	--

## Références

---

- [1] : <http://www.zonebourse.com/LAFARGE-4667/actualite/LAFARGE-reduit-sa-prevision-de-demande-de-ciment-pour-2010-13428062/>
- [2] : THESE d'*Elodie Rommillat* de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne  
*Etude des modes d'action d'agents de mouture sur le broyage du clinker \_Janvier 2006*
- [3] : Rapport de stage procédé de fabrication ciment par BERHEDDICH Safia, usine Asment TEMARA
- [4] : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Broyage>
- [5] : *Grindingtheory* Par *Bérangère Bailly – Juin 2007*
- [6] : [www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr) › Ressources documentaires
- [7] : Formation technique Asment Temara, M3\_Block3 Optimisation des broyeurs à boulets, par Lionel Corda-consultant industrie cimentière.
- [8] : REPORT CIMPOR TEC –Engenharia e Serviços Técnicos, S.A.  
DPPC/AEPP-Area de Engenharia de processo e Produtos\_TEMARA-Cementmill 1 process audit
- [9] Dombrowe, H., Hoffman, B., Scheibe, W., Mode of action and possibilities for use of grinding aids, ZKG International, V35, N11, pp 571-580 (1982).