

BTP : bâtiments et travaux publics

CPJ : ciment portland composition

C.C : charge circulante

d_{75} : 75% de la matière qui passe dans la maille de diamètre d

d_{50} : 50% de la matière qui passe dans la maille de diamètre d

d_{25} : 25% de la matière qui passe dans la maille de diamètre d

$R_{200\ \mu\text{m}}$: refus au tamis de 200 μm

$R_{80\ \mu\text{m}}$: refus au tamis 80 μm

BK2 : atelier de broyage à ciment 2

C_3S : $(CaO)_3SiO_2$

C_2S : $(CaO)_2SiO_2$

SOMMAIRE

| | |
|--|----------|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I:Présentation de l'organisme d'accueil | 3 |
| I- ASMENT TEMARA en bref :..... | 4 |
| II- Procédé de fabrication du ciment | 5 |
| 1- Préparation de la matière première :..... | 7 |
| 1.1- L'extraction :..... | 7 |
| 1.2- Concassage :..... | 7 |
| 1.3- Preparation de tas :..... | 7 |

| | |
|---|----|
| 1.4- Broyage de la matière première:..... | 8 |
| 1.5- Homogénéisation..... | 9 |
| 2- Cuisson..... | 9 |
| 2.1- Tour de préchauffage : | 9 |
| 2.2- Four rotatif : | 10 |
| 2.3- le refroidissement..... | 10 |
| 3- Broyage ciment et expedition | 11 |
| 3.1- Broyage | 11 |
| 3.2 - Ensachage et expédition : | 11 |
| Chapitre II: Généralités sur le broyage en cimenterie | 12 |
| Introduction | 13 |
| I- Broyeur à boulets..... | 13 |
| 1- Description | 13 |
| 1.1- Composants internes du broyeur ciment:..... | 15 |
| 1.1.1- Plaques de blindage:..... | 15 |
| 1.1.2- Diaphragme ou cloison de séparation:..... | 16 |
| 1.1.3- Les corps broyants :..... | 17 |
| 1.2- Consommation énergétique du broyeur : | 18 |
| 1.3- Contrôle du broyeur à boulets : | 19 |
| 1.4- Bilan aéraulique : | 19 |
| 1.5- Crash-stop:..... | 20 |
| II- Séparateur dynamique :..... | 20 |
| 1- Performances des séparateurs dynamiques : | 21 |
| 1.1- Ratio de ventilation: | 21 |
| 1.1.1- Charge circulante (CC) : | 22 |
| 1.1.2- Efficacité : | 22 |
| 1.1.3- La courbe de Tromp :..... | 23 |
| 1.1.4- Droite de Rosin_Rammler :..... | 23 |
| III- Filtre à manches : | 24 |
| IV- Atelier de broyage BK2 : | 24 |
| 1- Description | 24 |
| 1.1- Spécifications d'ASMENT TEMARA:..... | 26 |
| Chapitre III: Audit énergétique de l'atelier de broyage à ciment BK2..... | 27 |
| Introduction | 28 |
| I- La démarche de l'audit de l'atelier de broyage :..... | 28 |
| 1- Spécificités de l'audit : | 28 |
| 2- Démarche de l'audit..... | 28 |
| II- Résultats de l'audit:..... | 29 |

| | |
|--|-----------------------------|
| 1- Conditions d'établissement de l'audit..... | 29 |
| 1.1- Conditions atmosphériques..... | 29 |
| 1.2- Caractérisation de la matière première..... | 30 |
| III- Résultats de l'audit :..... | 31 |
| 1- Bilan aéraulique..... | 31 |
| 1.1- Air faux..... | 31 |
| 1.1- Vitesse dans le broyeur:..... | 34 |
| 1.2- Différence de pression :..... | 34 |
| 2- Bilan matière :..... | 34 |
| 2.1- Qualité du produit :..... | 34 |
| 2.2- Flux d'entrée :..... | 35 |
| 2.3- Flux de sortie..... | 35 |
| IV- Performances des équipements de l'atelier :..... | 36 |
| 1- Broyeur :..... | 36 |
| 1.1- Crash-stop:..... | 36 |
| 2- Le séparateur :..... | 41 |
| 2.1- Ratio de ventilation :..... | 41 |
| 2.2- Droite de Rosin_Rammler:..... | 41 |
| 2.3- Courbe de Tromp :..... | 42 |
| V- Résultats de l'audit et plan d'action :..... | 43 |
| Chapitre IV: Contribution de l'ajout des agents de moutures sur les performances du broyage..... | 45 |
| INTRODUCTION..... | 46 |
| I- Agent de mouture :..... | Erreur ! Signet non défini. |
| 1- Définition et fonction:..... | 46 |
| II- Influences des agents de mouture G et M au laboratoire :..... | Erreur ! Signet non défini. |
| 1- Objectif de l'étude:..... | 47 |
| 2- Méthodologie de travail :..... | 47 |
| 1.1- Matière première :..... | 48 |
| 1.1.1- Clinker :..... | 48 |
| 1.1.2- Calcaire :..... | 48 |
| 1.1.3- Gypse :..... | 48 |
| 1.1.4- Agents de moutures :..... | 49 |
| 1.2- Matériel de travail :..... | 49 |
| 1.2.1- Description du broyeur de type laboratoire GS 52 :..... | 49 |
| 3- Influence des agents de mouture sur le ciment CPJ 45:..... | 50 |
| 4- Essais industriels de l'adjuvant M :..... | 51 |
| 5- Evaluation du gain apporté par l'adjuvant MAPEI :..... | 53 |
| 5.1- Gain relatif à la consommation énergétique..... | 54 |

| | |
|---|----|
| 5.2- Gain relatif au débit de production :..... | 55 |
| Conclusion générale | 56 |

INTRODUCTION GENERALE

Au Maroc, malgré la situation économique internationale incertaine, l'industrie cimentière connaît un accroissement incomparable. En effet, En 2011, près de 16,13 millions de tonnes de ciment ont été écoulées, ce qui représente une hausse de 10,70% par rapport à l'année 2010 qui a enregistré près de 14,57 millions de tonnes.

Le cumul de la consommation du ciment en fin mars 2012 a enregistré une augmentation de 21,73% en passant de 3, 75 millions de tonnes à fin mars 2011 à 4,56 millions de tonnes à fin mars 2012. Le BTP fait le filon d'or du secteur cimentier en absorbant près de 13% de la consommation nationale, du fait que le Maroc s'est lancé dans plusieurs mégaprojets (Tanger-Med, Azur, villes nouvelles, autoroutes...) structurants dans plusieurs secteurs.

En revanche, le coût énergétique du pays est pénalisant pour une industrie fortement consommatrice d'énergie comme celle du ciment. Les cimenteries, de part le monde, sont en recherches continue pour satisfaire les besoins d'un marché en expansion à une consommation énergétique rationalisée et un rapport ciment/clinker (C/k) le plus optimal que possible.

Les différentes étapes de processus 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 procédés nouveaux.

C'est dans cette optique que s'inscrit mon projet de fin d'étude qui porte sur l'optimisation de la consommation énergétique du broyeur à ciment, via une évaluation des performances de l'atelier de broyage d'une part, et d'autre part, par l'étude de l'impact de produits dits « agents de mouture » sur la marche de l'atelier. L'objectif majeur de ce projet est donc de contribuer à l'amélioration du ratio (C/k) le principal paramètre décisionnel des cimenteries.

Le présent travail comporte quatre chapitres organisés de la façon suivante :

- Chapitre I : Il est consacré à une brève présentation d'ASMENT TEMARA ainsi que les différentes étapes du processus de fabrication du ciment;
- Chapitre II : Cette partie est dédiée à la description du processus de broyage du ciment. Par la suite nous passerons en revue les différentes caractéristiques d'un atelier de broyage du ciment et les paramètres influençant la dynamique de la matière et l'efficacité des opérations de broyage et de classification. Ensuite on donnera un aperçu sur l'atelier objet de l'étude, ainsi que les différents standards de bon fonctionnement des différents équipements constituant l'atelier.
- Chapitre III : Il a pour objet l'audit énergétique de l'atelier de broyage du ciment. C'est à ce stade que nous allons présenter les résultats des bilans aéraulique, matière, énergétique et thermique de l'atelier et qui nous ont permis de déduire les performances de l'atelier en question pour ensuite proposer des actions d'amélioration.
- Chapitre IV : Cette partie est consacrée à l'exposition des résultats d'une série d'essais que nous avons menée au niveau du laboratoire de contrôle qualité d'ASMENT TEMARA et qui ont pour but la détermination de l'apport des agents de mouture à l'amélioration du ratio C/k.

Chapitre I

Présentation de l'organisme d'accueil

I- ASMENT TEMARA en bref :

Située à 15 Km au sud de Rabat et fondée en 1976, ASMENT TEMARA est une société anonyme, filiale du groupe portugais CIMPOR. Elle appartenait au groupe Laraqui avant que le groupe portugais CIMPOR détienne 54% du capital en 1996.

ASMENT TEMARA a pour activité la production et la commercialisation de trois qualités de ciment (CPJ35, CPJ45 et CPJ55) avec une capacité annuelle de production prévue de 640.000 tonne, et qui atteint aujourd'hui près de 1.200.000 tonnes et un chiffre d'affaire en 2010 de 1.236.490.615 DH. Ainsi que deux filiales(Bitocim) d'approvisionnement en béton près à l'emploi.

Etant soucieuse de la concurrence accrue, ASMENT TEMARA mobilisent des moyens pour offrir un produit de qualité tout en respectant les normes environnementales sous une démarche qualité tout en augmentant son bénéfice. De ce fait, la société a été certifiée, en 2003, ISO 9001 version 2000 et en 2005. Elle a obtenu le label de certificat environnemental ISO 14001 version 2004.

Garantir la pérennité de l'entreprise, optimiser le processus de fabrication, veiller à la bonne gestion des ressources humaines et financières dans une optique respectant l'environnement et les normes en vigueur, sont tous les objectifs qu'ASMENT TEMARA s'acharne à y aboutir, et ce, via une structure administrative bien organisée comme présente l'organigramme suivant :

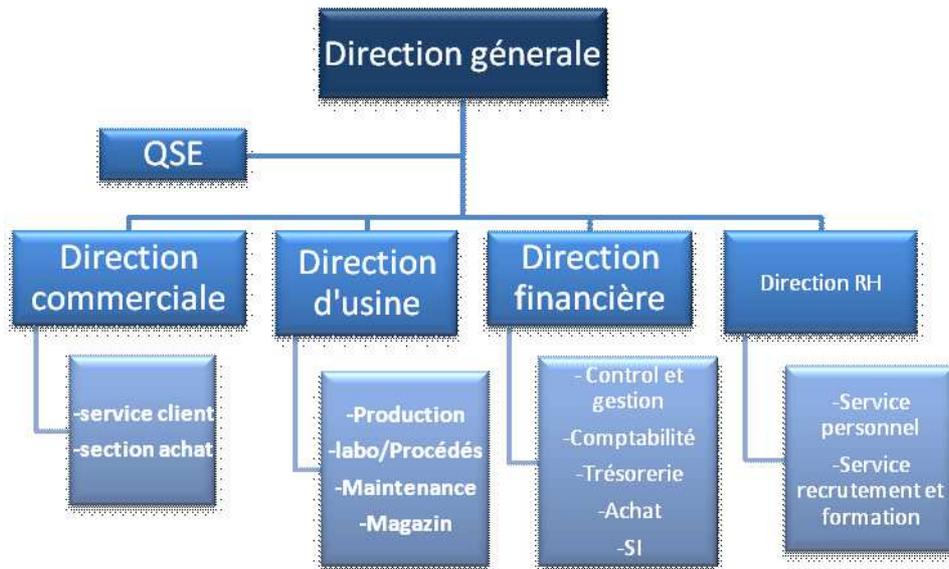


Figure 1: Organigramme ASMENT TEMARA

II- Procédé de fabrication du ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation. Après durcissement, il conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. (NM.10.1.004).

Le composant fondamental du ciment est le clinker qui est obtenu par réaction entre le silicate de calcium, l'oxyde de fer, l'oxyde d'aluminium et d'autres oxydes.

La cimenterie ASMENT TEMARA fabrique trois classes de ciment qui se distinguent par leur composition (minimum 65% du clinker), leurs résistances (tableau ci-dessous) et leurs usages. En plus de cela la cimenterie approvisionne le marché par du béton prêts à l'emploi.

| | La résistance à la compression de 28jours (MPa) | |
|--------------|---|-------------------|
| | Limite inférieure | Limite supérieure |
| CPJ35 | 22,5 | 45 |
| CPJ45 | 32,5 | 55 |
| CPJ55 | 42,5 | 65 |

Tableau 1 : limites de la résistance imposées par la norme

Le procédé de fabrication du ciment, quelque soit sa qualité, comporte trois grandes étapes :

- Préparation de la matière première ;
- Cuisson ;

- Broyage ciment ;

Le produit ainsi obtenu est délivré soit en sac ou en vrac.

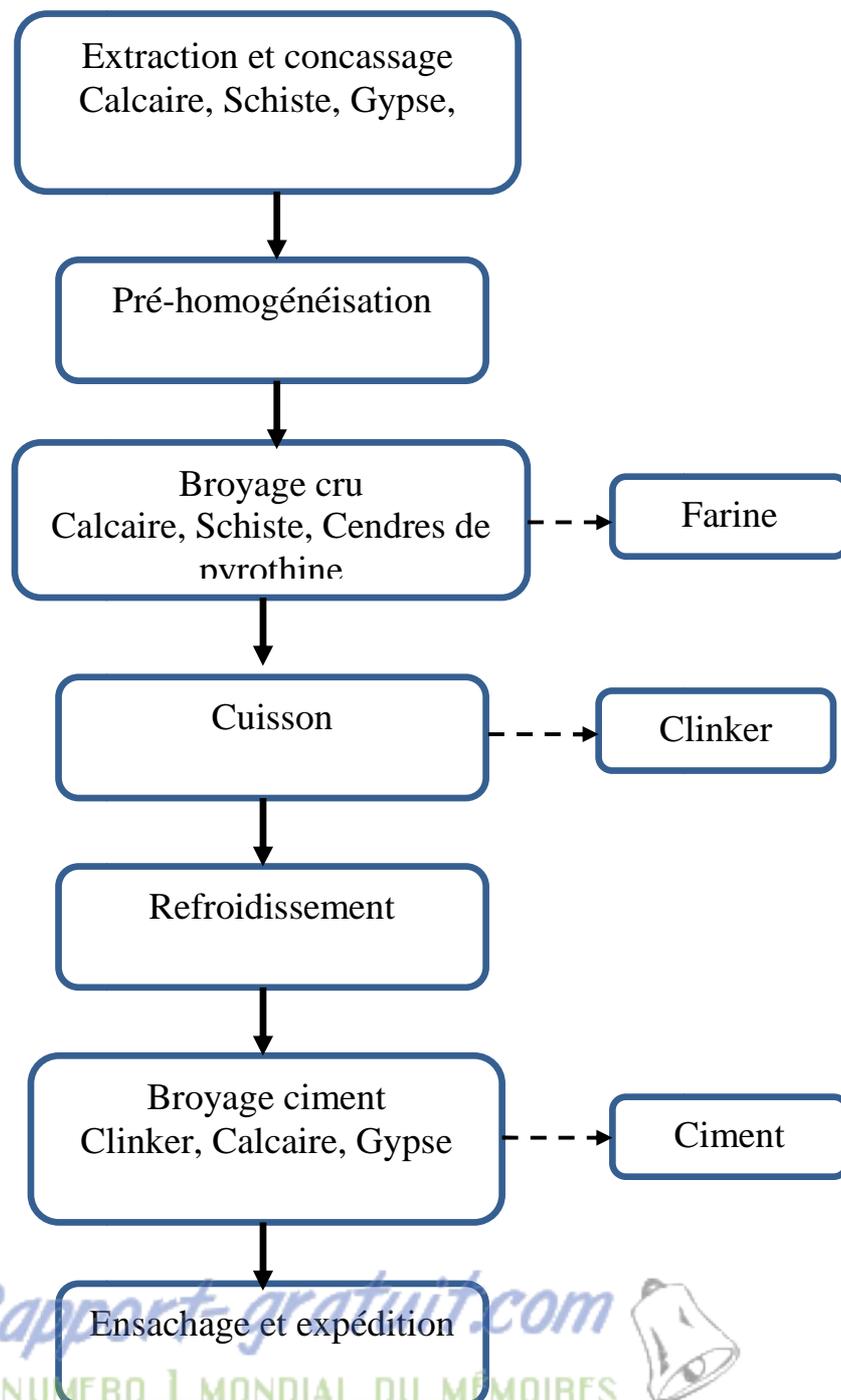


Figure 2: procédé de fabrication du ciment

1- Préparation de la matière première :

1.1- L'extraction :

Cette phase consiste à l'extraction des matières premières à savoir le calcaire source de carbonate de calcium (CaCO_3) et le schiste riche en silice (SiO_2), en alumine (Al_2O_3) et en oxyde de fer (Fe_2O_3). L'obtention de ces matières se fait par forage et abattage à l'explosif.

ASMENT TEMARA exploite trois carrières :

- Carrière Ouad Cherrat (Calcaire) ;
- Carrière calcaire Asment (Calcaire) ;
- Carrière Oued Ekem (Schiste)

1.2- Concassage :

La phase de concassage a pour objectif la réduction granulométrique de la matière première jusqu'à une dimension inférieure à 50 mm. ASMENT TEMARA dispose de deux types de concasseurs:

- Concasseur primaire à mâchoires pour le concassage du calcaire ASMENT et du calcaire riche en CaCO_3 .
- Concasseur secondaire à marteaux destiné au concassage du calcaire ASMENT, du calcaire riche et du schiste.

Une fois concassée, la matière 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.

1.3- Préparation de tas :

La matière première venant de la carrière présente des écarts en termes de composition, raison pour laquelle elle subit une pré-homogénéisation aboutissant à une matière de composition

moyenne constante. En effet la matière est acheminée par bande vers un parc de stockage où l'appareil de mise en stock mobile effectue une série de va et vient suivant un arc de cercle limité par des fins de course et décharge la matière sur la largeur du lit sous forme de couches superposées selon les analyse du laboratoire. Le hall d'homogénéisation contient deux tas d'une capacité de 20.000 t chacun, un alimentant l'usine et l'autre en phase de formation.

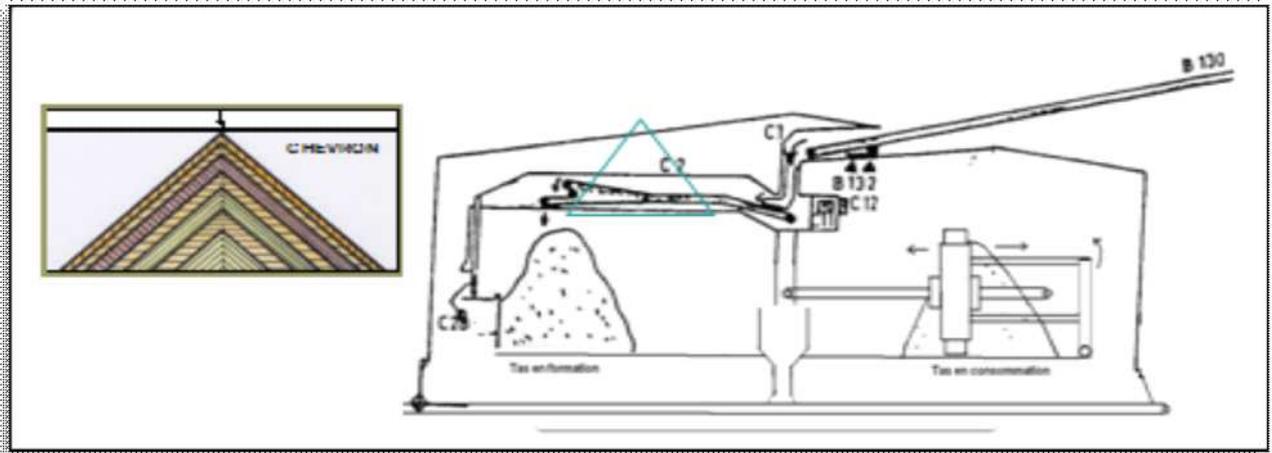


Figure 3: Préparation de tas

1.4- Broyage de la matière première:

Cette étape est destinée à l'affinement de la matière déjà concassée et homogénéisée pour faciliter les réactions chimiques dans la phase cuisson. A ce stade, la matière (tout venant) subit, en cas de besoins, des corrections avant son introduction dans les broyeurs. Pour se faire, quatre doseurs sont placés en amont du broyeur :

- Doseur de tout venant.
- 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.

ASMENT TEMARA dispose de deux broyeurs fonctionnant selon le même principe et qui diffèrent en terme de conception. En effet, les deux broyeurs sont des tubes cylindriques à boulets revêtus intérieurement de blindage et qui sont traversés par les gaz chauds venant de la cuisson pour assurer le séchage de la matière.

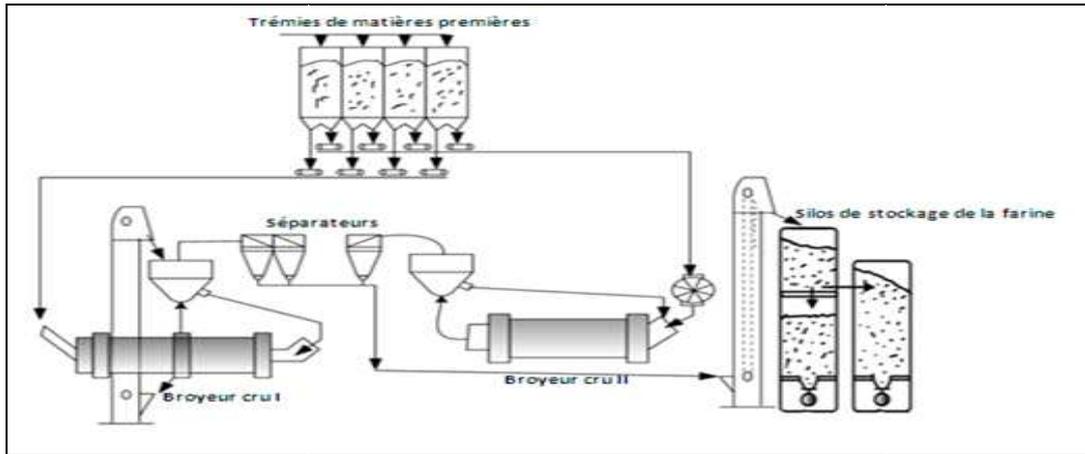


Figure 4 : Atelier Cru I&II

1.5- 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 de mélanger la matière et empêcher l'agglomération des particules.

2- Cuisson

La ligne de cuisson constitue le cœur de l'usine vu son installation et les frais qu'elle occasionne (combustible, entretien,...). Elle permet, à partir de la farine crue, d'élaborer le clinker, le composant principal du ciment et le garant de sa résistance.

La ligne de cuisson comporte :

- Une tour de préchauffage à 4 étages composée de 4 cyclones et d'un pré-calciateur ;
- Un four rotatif;
- Un refroidisseur.

2.1- Tour de préchauffage :

La tour de préchauffage est 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 ainsi que sa calcination jusqu'à 90% avant son introduction dans le four. En effet, Les gaz chauds sont tirés et circulent à grande vitesse dans les cyclones de la tour échangeuse. La farine est injectée à la partie supérieure et descend par gravité dans les cyclones successifs pour pénétrer ensuite dans un pré-calciateur. Ce dernier contient les gaz de combustion du coke de pétrole et qui permet d'optimiser la consommation énergétique d'une part et de réduire les émissions en NO₂ d'une autre part.

2.2- Four rotatif :

Il s'agit d'un cylindre creux légèrement incliné et revêtu intérieurement de brique réfractaire et isolant pour protéger la virole vu la très haute température régnant à l'intérieur. 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 achevée ;
- ✓ Zone de clinkerisation au sein de laquelle le C_2S est combiné avec la chaux libre pour donner le C_3S qui, une fois refroidi, donne les nodules de clinker.

2.3- le refroidissement

Le clinker obtenu subit une trompe au niveau du refroidisseur. Celle-ci permet de figer le clinker dans l'état où il se trouve aux hautes températures ce qui affecte la texture et la réactivité de ses composés. D'autre part le choc thermique provoqué par la trempe cause des fissurations des grains ce qui facilite leur fragmentation pendant l'élaboration du ciment. ASMENT TEMARA dispose d'un refroidisseur constitué de :

- Quatre grilles statiques, de longueur 50 cm chacune, où le clinker subit une première trempe.
- Un refroidisseur Polytrack constitué de six Tracks qui font circuler le clinker en avant.
- Le refroidisseur Fuller est formé par des grilles perforées et portées sur un châssis mobile. Il comprend une série de plaques fixes et mobiles.

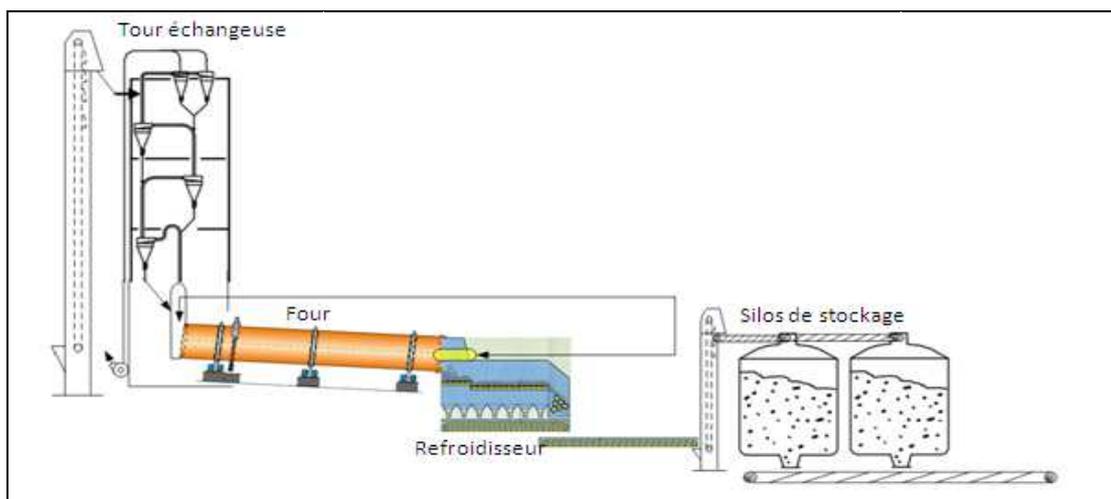


Figure 5: Phase de cuisson

3- Broyage ciment et expedition

3.1- Broyage

Le clinker à la sortie de refroidisseur est sous forme de nodules ou de blocs. 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.

L'atelier de broyage ciment d'ASMENT TEMARA comprend trois broyeurs à boulets (BK1, BK2 et BK3). Plus de détails sont donnés au chapitre suivant.

3.2 - Ensachage et expédition :

Le ciment obtenu est délivré en sac ou en vrac, ASMENT TEMARA a prévu un atelier d'ensachage automatisé qui est constitué de :

- Cinq silos de stockage de ciment ;
- Quatre machines ensacheuses ;
- Trois ligne de livraison en sac et deux pour le vrac.

Chapitre II

Généralités sur le broyage en cimenterie

Introduction

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. Le broyage est un processus qui alourdit la facture énergétique des unités y ayant recours et son incidence économique est très grande à cause des investissements réalisés, des frais d'entretien, de la consommation énergétique et du coût des corps broyant. Sa maîtrise reste donc une priorité de tout cimentier.

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 de broyage du ciment.

I- Broyeur à boulets

1 - Description

C'est un tube cylindrique en acier tournant autour de son axe 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 ou plusieurs chambres de broyage par des structures en acier de conception constructive spécifique en acier dénommées diaphragmes ou cloisons de séparation. Le tube est chargé de corps broyeurs sphériques à alliage résistant.

La première chambre, chargée de boulets de plus grand diamètre (entre 90 et 60 mm), est habituellement revêtue d'un blindage releveur qui doit soulever, laisser rouler les corps broyants sur le matériau. Quant à la deuxième chambre, où des boulets de diamètre légèrement inférieur (entre 50 et 17 mm) sont mis en place, elle est revêtue d'un blindage classant.

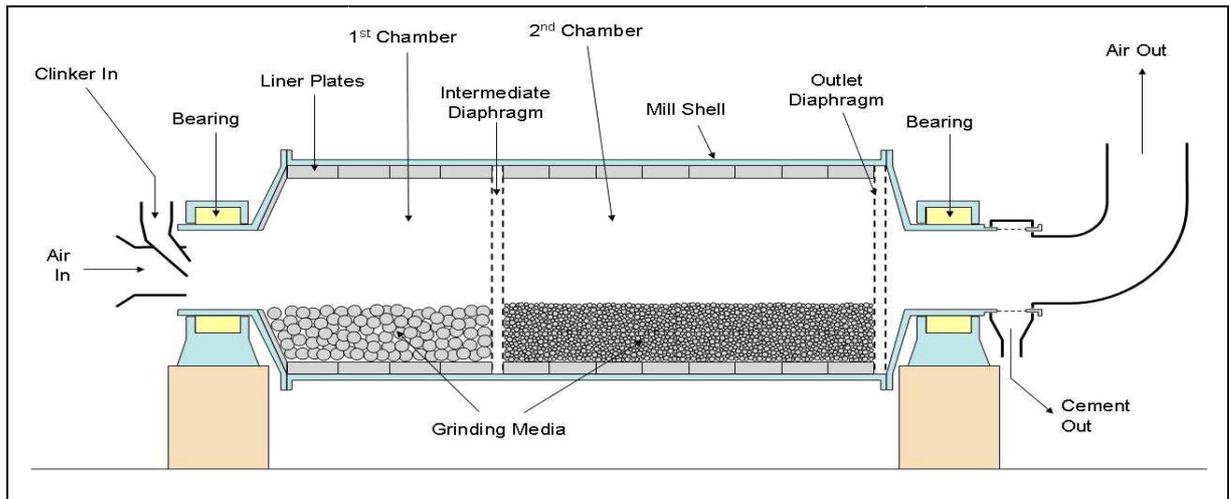


Figure 6 : Schéma d'un broyeur à ciment

La réduction de la dimension du matériau alimentant le broyeur est effectuée au moyen du mouvement de la charge broyante, du à la rotation du broyeur qui élève les corps broyants à une hauteur optimale et les fait retomber et glisser continuellement sur eux-mêmes et sur le matériau sous forme d'une cascade. Le broyage est ainsi effectué par impact, compression, frottement et attrition entre les corps broyants et la matière.

Les broyeurs peuvent être utilisés en circuit ouvert ou en circuit fermé. Dans la première configuration, la matière traverse le broyeur une seule fois, chose qui peut nuire à la distribution granulométrique du produit fini qui n'est pas maîtrisable. De plus, l'ajustement de la charge broyante doit être fait avec précaution en fonction du produit fini. Quant à 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, le matériau d'alimentation, lorsqu'il sort du broyeur, est mécaniquement transporté ou entraîné jusqu'au classificateur de particules (statiques, dynamiques ou combinaison des deux). Ainsi, le matériau est soumis au processus de classification sélective des particules dont la fraction grosse retourne dans le broyeur et dont la

fraction fine qui est le produit final part vers l'étape qui suit. Cette configuration présente les avantages suivants :

- L'ajustement de la finesse du produit fini sans pour autant 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 ;
- Control aisé de la température ;
- Diminution du risque de coating⁽¹⁾ et d'agglomération des fines ;

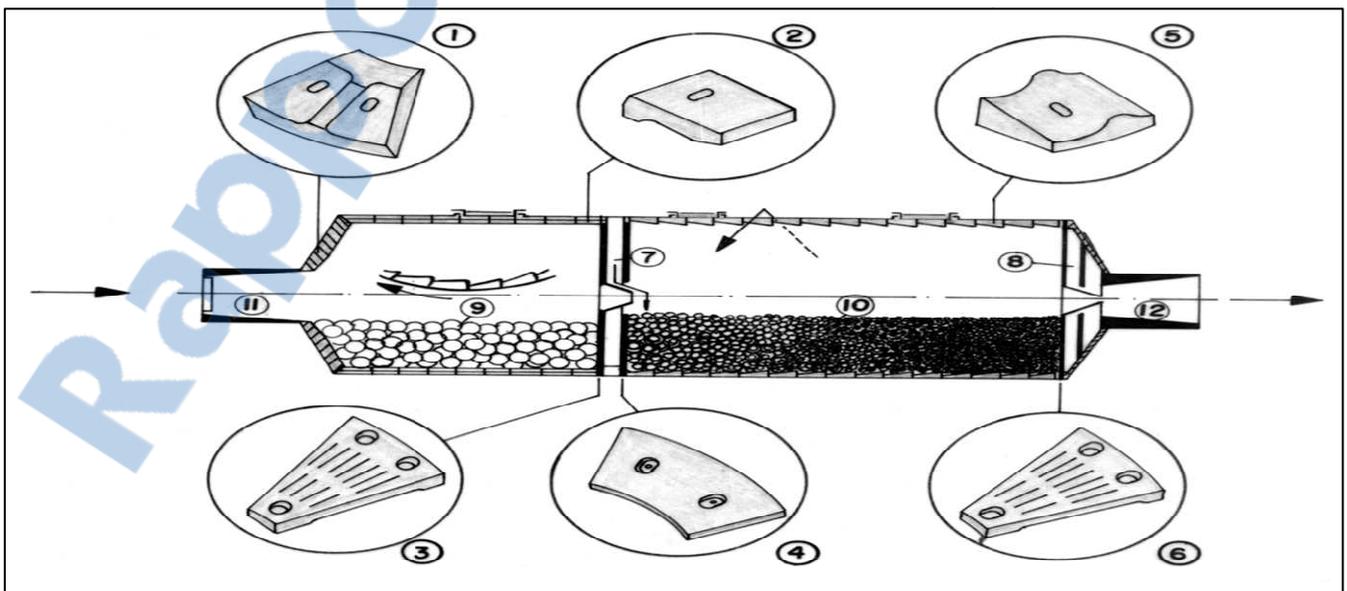
1.1- Composants internes du broyeur ciment:

1.1.1- Plaques de blindage:

La virole du broyeur est protégée par des plaques de revêtement ou de blindage résistant aux forces d'impact causées par l'élévation continue des corps broyants ainsi que par l'usure causée par attrition entre les corps broyants, le matériau et les dites plaques.

Le matériau choisi pour la fabrication des plaques doit satisfaire aux exigences suivantes :

- Caractéristiques métallurgiques techniquement appropriées;
- Durcissement et composition structurale homogène;
- Résistance élevée aux efforts dus aux chocs ou impacts à répétition;
- Taux d'usure faible, sans déformations, ruptures ou fissures.



2-revêtement élévateur de la première chambre

8-diaphragme de sortie/décharge

3-grilles d'entrée du diaphragme intermédiaire

9-charge broyante de la première chambre

- | | |
|---|---|
| 4-plaques de fond du diaphragme intermédiaire | 10-charge broyante de la deuxième chambre |
| 5-revêtement auto-classificateur | 11-tourillon d'entrée |
| 6-grille d'entrée du diaphragme de sortie | 12-tourillon de sortie/décharge |

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.

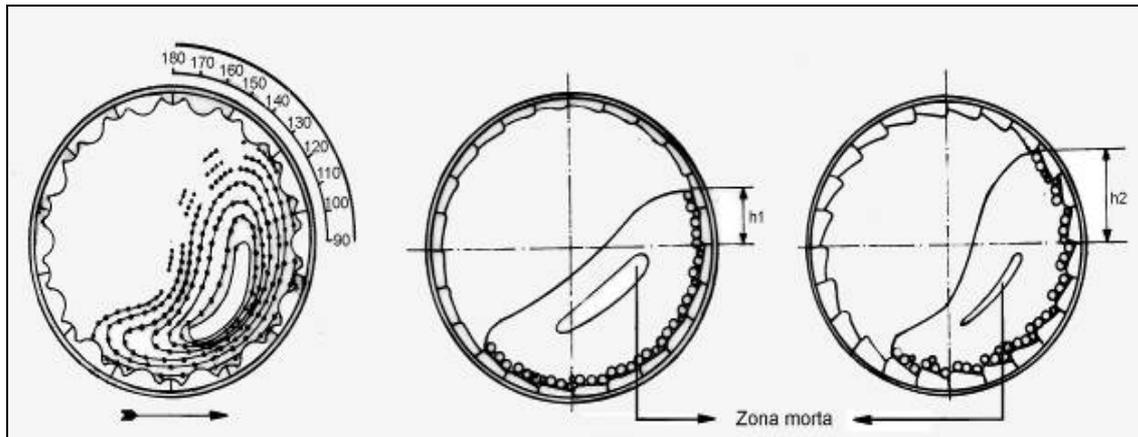


Figure 8: zone morte dans le broyeur

Le revêtement releveur, en raison de sa conception permet un soulèvement optimal des corps broyants pour une zone morte minimisée tout en tenant compte des caractéristiques du matériau et du broyeur. Le revêtement classificateur ou auto-classificateur est constitué de plaques qui classent la charge broyante par ordre décroissant du diamètre dans les sens du flux du matériau. Ainsi, nous avons toujours une répartition de la charge broyante adéquate à la surface spécifique du matériau qui est en cours de broyage.

1.1.2- 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.

Le diaphragme, dans un broyeur, 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 respectifs de broyage;
- Transférer le matériau d'un compartiment à l'autre jusqu'à ce que ce dernier atteigne la décharge du broyeur;

- 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.

1.1.3-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.

1.1.3.1- 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.

De ce fait, pour le broyage de grosses, on utilise habituellement des boulets avec un diamètre entre 50 et 90mm et pour le broyage de fines entre 15 et 50mm;

La définition de la taille maximale et minimale d'un boulet ainsi que sa composition 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 suivant :

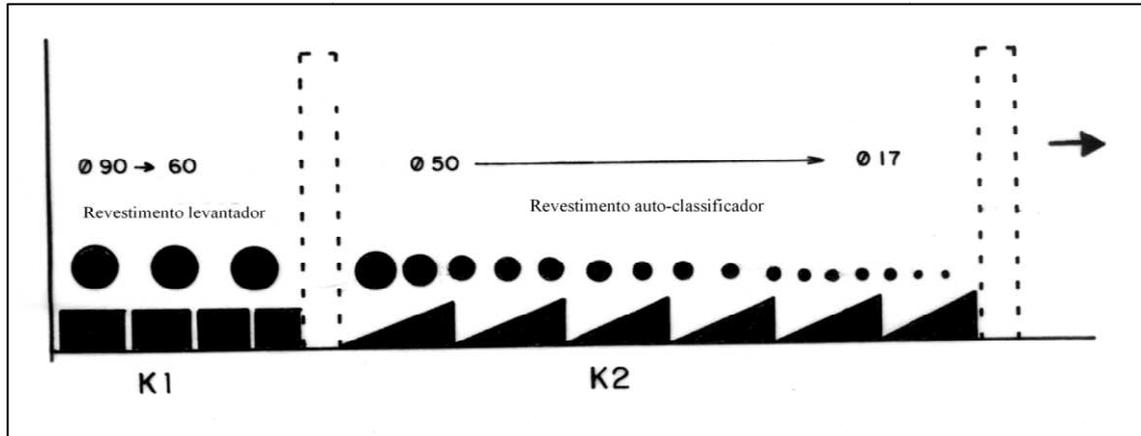


Figure 9: distribution de la charge broyante le long de broyeur

1.1.3.2- Degré de remplissage ou charge spécifique :

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

L'entraînement de la matière dans le broyeur est assuré par le flux d'air le traversant. Le débit d'air dans le broyeur doit permettre l'évacuation des particules ayant la dimension requise.

1.2- Consommation énergétique du broyeur :

La puissance totale exigée pour faire fonctionner un broyeur tubulaire à boulets est égale à la puissance nécessaire pour maintenir le centre de gravité de la charge broyante dans une position d'équilibre cinétique, plus les pertes de puissance par inertie, frottement des tourillons d'appui, transmission et rendement du moteur.

La puissance absorbée par les terminaux du moteur d'actionnement du broyeur est égale à la somme des puissances consommées par les chambres du broyeur, accrue des pertes découlant du système d'actionnement par rapport à l'efficacité de leurs composants respectifs de transmission de puissance. La puissance totale consommée par le broyeur doit toujours être inférieure à la puissance disponible ou nominale du moteur. Il faut donc, 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. Plusieurs études ont montré que seulement 5% de la puissance fournie à l'axe du broyeur est utilisée pour la fragmentation proprement dite, le reste est dissipé sous forme de pertes.

1.3- Contrôle du broyeur à boulets :

Le contrôle ou la conduite des broyeurs diffère d'une industrie à une autre et même d'une usine à une autre du même secteur. Néanmoins, les objectifs restent semblables et qui consistent en 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 parce que de nombreux facteurs peuvent conduire à des variations et affectent l'opération:

- Changement de la matière première (Calcaire, clinker, etc.);
- Variation de la broyabilité;
- Variation de la granulométrie de l'alimentation;
- Variation de l'humidité;
- Variation de la température;
- Usure (charge de boulets, équipements, ...).

1.4- Bilan aéraulique :

Parmi les moyens d'évaluation des performances d'un broyeur, il consiste à quantifier le taux d'air faux (ou air parasite) et à déterminer la vitesse et la différence de pression dans le broyeur. Il consiste à déterminer les débits d'air à l'entrée et sortie du broyeur via des mesures de pression, de température et de la vitesse.

L'équation régissant le bilan aéraulique est comme suit :

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

Avec :
 Q_e : débit entrant (Nm^3/h) ;
 $Q_{air\ faux}$: débit d'air faux (Nm^3/h) ;
 Q_s : débit sortant (Nm^3/h).

Pour boucler le bilan, les débits sont transformés en conditions normales qui est donnée par la formule suivante :

$$Q \left(\frac{Nm^3}{h} \right) = Q \left(\frac{m^3}{h} \right) * \left(\frac{273}{273+T} \right) * \left(\frac{Patm+Ps}{Patm} \right)$$

1.5- Crash-stop:

Le crash-stop du broyeur a pour but de vérifier l'usure des équipements internes et d'observer les phénomènes du processus de broyage qui ont lieu à l'intérieur de celui-ci et de voir la compatibilité de la charge broyante avec le profil granulométrique de la matière broyée. Ceci via des échantillonnages horizontaux de la matière et des boulets selon le plan ci-dessous :

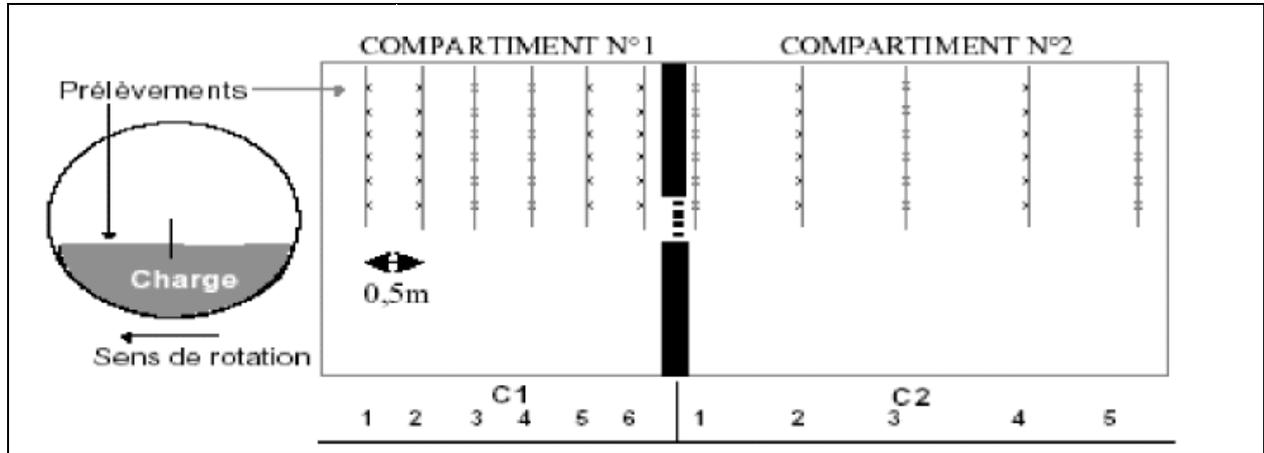


Figure 10: Plan d'échantillonnage

L'analyse de ces échantillons permet d'évaluer l'efficacité du broyage et de procéder à des corrections de la charge en cas de besoin.

II- Séparateur dynamique :

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 permet de :

- Séparer le matériau en une fraction fine et en une autre plus grosse;
- Augmenter l'efficacité des broyeurs;
- Optimiser la récupération des fines;
- Déterminer la taille maximum des particules du produit fini;

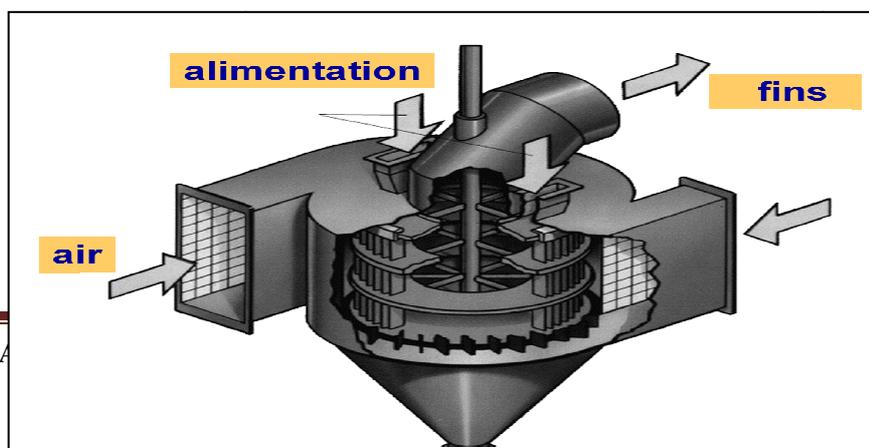


Figure 11: séparateur dynamique 3^{ème} génération

La classification des particules met en jeu la résultante des trois forces centrifuge, de tirage et de gravité.

Les séparateurs dynamiques ont connu des améliorations, au cours du temps, liées à leur conception, mais actuellement se sont les séparateurs à haute efficacité ou de 3^{ème} génération qui sont les plus utilisés en particulier dans l'industrie cimentière.

1- Performances des séparateurs dynamiques :

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

- Ratio de ventilation (Alimentation / Flux d'air) ;
- Charge circulante (C.C.);
- Efficacité ;
- Courbe de Tromp;
 - ✓ Point de coupe ;
 - ✓ Diamètre limite ;
 - ✓ By-pass ;
 - ✓ Imperfection ;
- Droite de Rosin_Rammler.

1.1- Ratio de ventilation:

L'un des paramètres qui influence le plus 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.

1.1.1- Charge circulante (CC) :

Elle se définit en tant que rapport entre le flux d'alimentation par rapport à celui de produit fini. La C.C. optimale dépend:

- Finesse du produit;
- Granulométrie de l'alimentation fraîche;

- Dimension du broyeur (L/D);
- Taille et type de séparateur;
- Ventilation du broyeur;
- Profil de la charge broyante;
- Réglage du Séparateur (flux);
- Equipements auxiliaires;

En cimenterie, 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;
- Augmentation de temps de séjour ;
- Production des ultrafines qui donne naissance au problème de coating.

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

- Augmentation de flux de matière dans le broyeur ;
- Temps de séjour très court ;
- Alimentation de séparateur par de grosses particules ;
- Surcharge du séparateur ;
- Diminution de la productivité.

1.1.2- 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.

1.1.3- La courbe de Tromp :

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

- 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^{ème} génération.

1.1.4- Droite de Rosin_Rammler :

La droite de Rosin_Rammler caractérise la distribution granulométrique de la matière et elle est donnée par l'équation suivante:

$$\ln \left(\ln \left(\frac{100}{R} \right) \right) = n \ln(d) - n \ln(d_0)$$

Où n : la dispersion de la distribution ;
 d_0 : le diamètre moyen de l'échantillon.

Pour un séparateur de 3^{ème} génération la pente de cette droite doit être >1 .

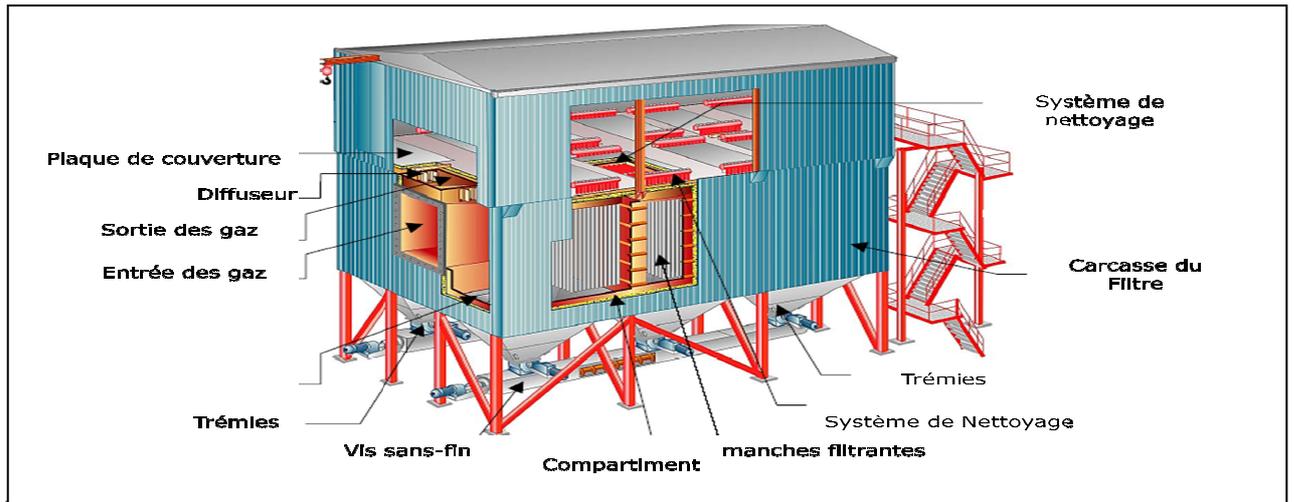
Les performances du séparateur sont affectées par l'existence de fuites d'air ou d'air faux. Le bilan aéraulique du séparateur permet de quantifier la quantité d'air inutile dans celui-ci et d'évaluer la différence de pression entre son entrée et sa sortie.

III- Filtre à manches :

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 (*wiki). Elles sont définies selon deux caractères principaux :

- Position des manches filtrantes : On peut distinguer essentiellement les appareils à manches horizontales et les appareils à manches verticales.
- Principe de décolmatage : Le décolmatage est souvent 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.



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. Le colmatage peut être déduit de la différence de pression dans le filtre qui doit avoir une valeur limite bien déterminée selon le type d'application.

IV- Atelier de broyage BK2 :

1- Description

L'atelier de broyage BK2 est conçu pour la fabrication de deux qualités du ciment (CPJ35, CPJ45), et comporte les équipements suivants :

- 4 doseurs ;
- Un broyeur à boulets ;
- Séparateur dynamique de 3^{ème} génération ;
- Filtre à manches ;
- Elévateur à godets ;
- Des aérauglissières.

Le schéma ci-dessous illustre ces équipements.

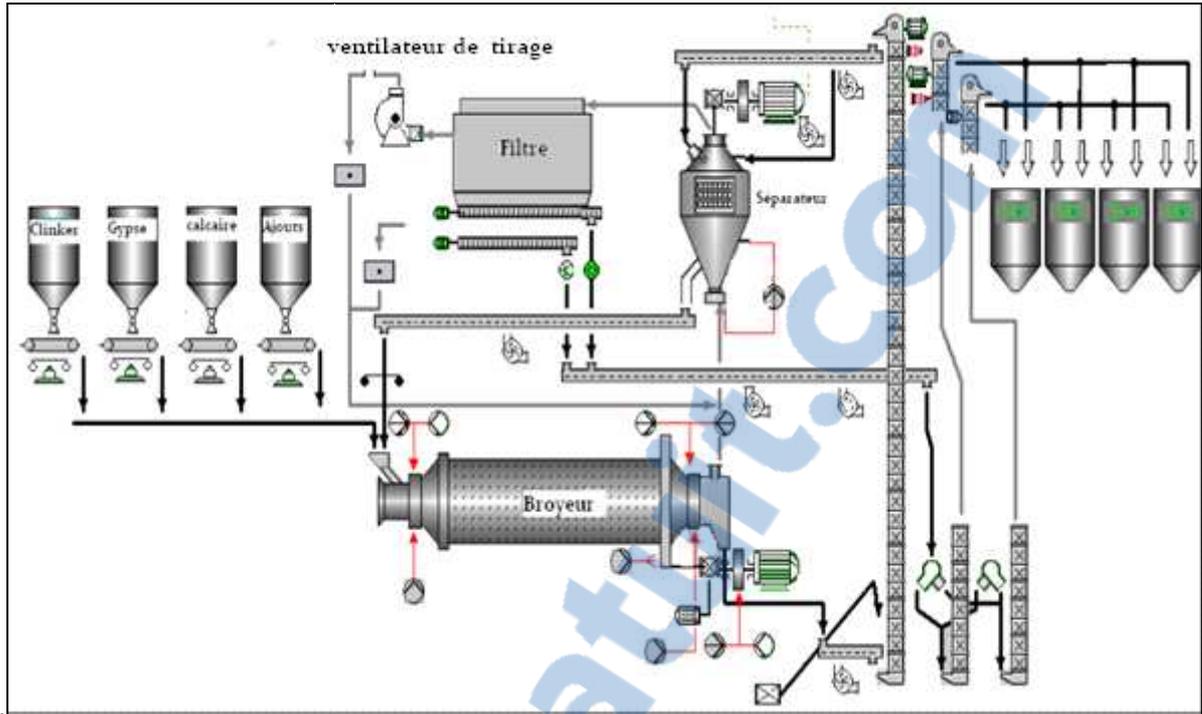


Figure 13: schéma synoptique de l'atelier BK2

Les doseurs sont placés sur les bandes alimentant la trémie qui verse dans le broyeur. Ils permettent la conversion des pourcentages des matières premières émises par le laboratoire en débit horaire. Ces doseurs sont ajustés et contrôlés par des armoires de régulation. Quant aux cendres volantes, elles sont introduites au niveau de l'élévateur alimentant le séparateur.

Les doseurs en question font l'objet d'une vérification périodiques ou à la demande du service laboratoire de contrôle qualité en cas de dérive constatée au niveau des analyses par le biais de pesées par camion. Celles-ci permettent le contrôle et l'étalonnage des pesants des doseurs en fonction de la consigne de la salle des commandes.

La matière est entraînée par le flux d'air traversant le broyeur. Une fois broyée, elle est transportée via des aérauglissières et un élévateur vers le séparateur dynamique. Ce dernier, selon son réglage, fait la classification des particules selon leur granulométrie. Les grosses particules sont renvoyées au broyeur (Rejet) alors que les fines alimentent le filtre à manches.

1.1- Spécifications d'ASMENT TEMARA:

Les paramètres de performances des différents équipements de l'atelier de broyage sont présentés dans le tableau ci-dessous :

| | |
|--------------------------------|-------------------------|
| Différence de pression broyeur | <200 mmH ₂ O |
|--------------------------------|-------------------------|

| | |
|--|----------------------------|
| Vitesse d'air à l'intérieur du broyeur | 1-2 m/s |
| Différence de pression séparateur | 200-250 mmH ₂ O |
| Ratio de ventilation | <2 Kg/m ³ |
| CC | 2-3 |
| By-pass | 5-10% |
| Limite d'acuité | 10-15 µm |
| Imperfection | <0,3 |
| Pente de Rosin_Rammler | >1 |
| Différence de pression filtre | 100-150 mmH ₂ O |

Table 2: Critères de performances

Les spécifications des différents équipements sont présentés en **Annexe 2**.

Le chapitre suivant sera consacré à l'établissement du bilan permettant la quantification de ces paramètres en vue d'évaluer l'efficacité des opérations de broyage et de classification.

Chapitre III

Audit énergétique de l'atelier de broyage à ciment BK2

Introduction

La maîtrise de processus de broyage est un moyen permettant de faire des économies importantes d'énergie, raison pour laquelle la cimenterie prévoit des audits énergétiques de ses ateliers. L'atelier de broyage à ciment a fait l'objet d'un diagnostic de performances que nous avons effectué pendant la période de 27 et 31 Mars 2012.

Dans cette partie, nous allons présenter la démarche pour laquelle nous avons opté ainsi que les résultats de l'audit de l'atelier de broyage notamment des bilans aéraulique, massique, énergétique et thermique, pour ensuite établir un plan d'action des améliorations à prévoir.

I-

La

démarche de l'audit de l'atelier de broyage :

1-

Spécificités

de l'audit :

L'audit de l'atelier de broyage s'est étalé sur une période de 24h pendant laquelle nous avons gardé les mêmes conditions de marche. Pendant cette période c'est le ciment CPJ 45 qui est produit. Ce produit doit satisfaire aux exigences de qualité suivantes :

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

| | |
|-----------------------------------|-------|
| R ₈₀ μm | <3,5% |
| R ₂₀₀ μm | <5% |
| C _a O _{libre} | <2% |
| SO ₃ | <4% |

Table 3 : spécifications de qualité du CPJ45

2- Démarche de l'audit

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

1- La détermination des différents points de mesure ainsi que les grandeurs à mesurer (**Annexe 3**).

- Entrée broyeur;
- Sortie broyeur ;
- Entrée séparateur ;
- Entrée filtre ;
- Sortie filtre ;
- Air frais de recirculation ;
- Recirculation ;
- Cheminée ;

2- La préparation des fiches de calcul.

3- La préparation du matériel de mesure :

- Tube de Pitot de type S dont le principe de mesure est présenté en **Annexe4**.
- Thermomètre.
- Anémomètre.
- Manomètre.

Après stabilisation de la marche de l'atelier, nous avons démarré l'audit par :

- 4- La lecture des différents compteurs (doseurs de la matière, consommation électrique).
- 5- La mesure des débits, températures et pressions.
- 6- L'échantillonnage de la matière au niveau de séparateur.
- 7- Le crash-stop du broyeur et échantillonnage horizontal des boulets et de la matière.

La dernière étape de l'audit portera sur l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus afin d'identifier les anomalies de l'atelier pour ensuite procéder à des améliorations de la marche celui-ci.

II- Résultats de l'audit:

1- Conditions d'établissement de l'audit

1.1- Conditions atmosphériques

Les différentes mesures que nous avons effectuées étaient dans les conditions atmosphériques suivantes :

| | |
|------------------------------|-----|
| Température ambiante (°C) | 20 |
| Pression barométrique (mmHg) | 761 |
| Humidité relative (%) | 64 |
| Humidité absolue (%) | 1,4 |

Table 4: conditions atmosphériques pendant l'étude

1.2- Caractérisation de la matière première

La granulométrie de l'alimentation du broyeur :

| | d ₈₀ (mm) | d ₅₀ (mm) | d ₂₀ (mm) | Wi (KWh/t) |
|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------|
| Clinker | 15 | 4,9 | 0,53 | 16,27 |
| Calcaire | 8 | 1,6 | 0,3 | 11,19 |
| Gypse | 14,6 | 3,7 | 0,29 | 9,23 |
| Cendres volantes | 0,07 | - | - | - |

Table 5: granulométrie de l'alimentation

La vérification des doseurs, du clinker et du calcaire, a montré que ceux-ci présentent une erreur de 8,6% pour le premier et 7,9% pour le deuxième alors que la valeur tolérée est de $\pm 3\%$.

Cet écart fait que l'alimentation du broyeur est inférieure à la consigne.

Après corrections et étalonnage des doseurs les valeurs des différents débits sont résumés dans le tableau suivant :

| | Débit (t/h) | % | Température | Humidité (%) |
|--|-------------|---|-------------|--------------|
|--|-------------|---|-------------|--------------|

| | | | | |
|-------------------------|------|------|-----|-----|
| Clinker | 36 | 74,6 | 102 | 0 |
| Calcaire | 7,4 | 15,4 | 17 | 5,1 |
| Gypse | 1,9 | 3,9 | 22 | 0,3 |
| Cendres volantes | 3 | 6,1 | 37 | 0,3 |
| Alimentation séparateur | 98,2 | - | 95 | - |
| Rejet séparateur | 49,9 | - | 74 | - |
| Produit final | 48,3 | - | 68 | 0,3 |

Table 6 : Débits de l'atelier

III- Résultats de l'audit :

1- Bilan aéraulique

1.1- Air faux

Les résultats des mesures aérauliques obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

| | T (°C) | Ps (mmCE) | Débit | | V (m/s) |
|-------------------|--------|-----------|-------|---------------|---------|
| | | | Nm3/h | Nm3/Kg ciment | |
| Entrée_broyeur | 23 | 0 | 11300 | 0,234 | - |
| Sortie_broyeur | 97 | -106 | 32500 | 0,6731 | 8,4 |
| Entrée_séparateur | 59 | -158 | 63600 | 1,317 | 14,8 |
| Entrée_filtre | 74 | -309 | 64700 | 1,3387 | - |
| Sortie_filtre | 70 | -483 | 69900 | 1,4461 | 25,7 |

| | | | | | |
|----------------------------|----|---|-------|--------|------|
| Air frais de recirculation | 25 | 0 | 18000 | 0,3732 | - |
| Recirculation | - | - | 31100 | 0,6439 | - |
| Cheminée | 75 | 3 | 56800 | 1,1754 | 11,6 |

Table 7: Mesures aérauliques

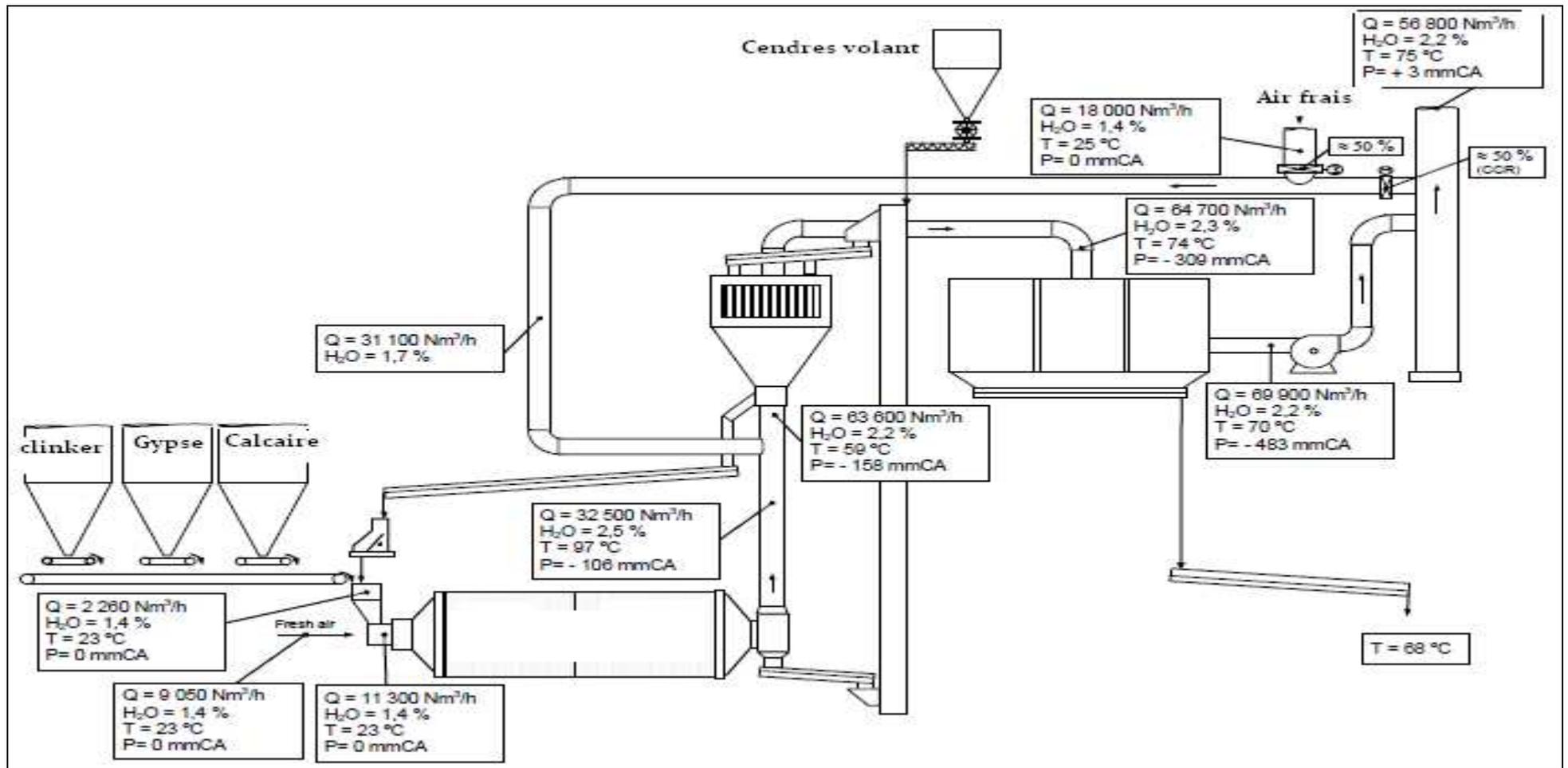


Figure 14 : Atelier de broyage BK2

Ainsi, on calcule les débits d'air faux dans les différents équipements de l'atelier et par la suite le pourcentage d'air faux qui est donné par la relation suivante :

$$\%Air\ faux = \frac{Q_{air\ faux} * 100}{Q_s}$$

Pour évaluer l'importance de cet air, on les comptabilise par rapport au débit de ventilateur qui est de 69900 Nm³/h. Les résultats obtenus sont :

| | Broyeur | Séparateur | filtre |
|---------------------|---------|------------|--------|
| Entrée | 11300 | 63600 | 64700 |
| Sortie | 32500 | 64700 | 69900 |
| Air_faux | 21200 | 1100 | 5200 |
| Total air_faux | 27500 | | |
| % air_faux | 65,23 | 1,7 | 7,44 |
| % toléré | 45 | 3 | 3 |
| % débit ventilateur | 30,33 | 1,57 | 7,44 |

Table 8: Taux d'air faux dans l'atelier de broyage

❖ **Remarque :**

On remarque que l'air faux total présent dans l'atelier de broyage est de 27500 Nm³/h ce qui correspond à environ 40% de flux de sortie du ventilateur, la contribution du broyeur est de 30%. Un taux important par rapport à la valeur tolérée qui est de 45%. Quant au séparateur la valeur calculée est de 1,7% qui est dans l'intervalle toléré. Or, pour le filtre, l'air faux présente un pourcentage de 7,44% qui est aussi supérieur à la valeur tolérée.

❖ **Interprétation :**

Ces résultats peuvent être expliqués par les entrées d'air observées lors de la visite des équipements de l'atelier BK2 et qui concernent :

- La rupture des joints d'étanchéité à l'entrée et sortie du broyeur ;
- Les trous dans la conduite d'entrée séparateur ;

- L'étanchéité des portes du filtre à manches.

Les photos représentant ces observations sont présentées dans l'**Annexe5**. La présence d'air faux dans l'atelier, affecte ses performances et augmente sa consommation énergétique.

1.1- Vitesse dans le broyeur:

La vitesse dans le broyeur mesurée par l'anémomètre est de 1.6 m/s, qui est dans l'intervalle recommandé.

1.2- Différence de pression :

La différence de pression que nous avons déterminée pour chaque équipement est comme suit :

| | Différence de pression en mmH ₂ O | Limites en mmH ₂ O |
|------------|--|-------------------------------|
| Broyeur | 107,10 | <200 |
| Séparateur | 151,00 | 200-250 |
| Filtre | 174 | 100-150 |

Table 9 : Différence de pression dans l'atelier

❖ Remarque :

On remarque que la différence de pression dans le broyeur est dans l'intervalle recommandé avec une valeur de 107 mmH₂O. En revanche, la différence de pression entre l'entrée et la sortie du séparateur (151 mmH₂O) est au dessous de la limite tolérée. Quant au filtre, la valeur obtenue est légèrement supérieure à la limite supérieure acceptable.

❖ Interprétation :

La valeur obtenue de la différence de pression dans le séparateur est due à la présence d'air faux dans celui-ci ce qui engendre une mauvaise ventilation de l'installation voire une dispersion de la matière limitée.

Pour le filtre, l'augmentation de la différence de pression est engendrée par le colmatage des manches filtrantes. Ce fait est observé lors du contrôle visuel des toiles.

2- Bilan matière :

2.1- Qualité du produit :

Les analyses physico-chimiques du ciment CPJ45, que nous avons effectuées au laboratoire ASMENT TEMARA ont donné les résultats suivants

| | Mesuré | Objectif |
|---|--------|----------|
| R80 μm (%) | 2,3 | <3,5 |
| R45 μm (%) | 19 | - |
| Surface spécifique de Blaine (cm^2/g) | 3440 | 3200 |
| SO ₃ | 2,7 | <4 |
| CaO _l | 1,5 | <2 |
| Perte au feu | 7,48 | <10 |
| Résistance 2j (Mpa) | 16,2 | >12 |
| Résistance 7j (Mpa) | 27,6 | - |
| Résistance 28j (Mpa) | 39,8 | >35 |

Table 10 : Analyse physico-chimique du ciment CPJ45

On remarque que le CPJ 45 produit, durant la période de l'audit, en comparaison avec les spécifications imposées par la norme est conforme.

L'étape suivante consiste à identifier, en cas d'existence, les fuites de matière ou encore accumulation de celle-ci dans le broyeur. Les résultats obtenus sont comme suit.

2.2- Flux d'entrée :

| | Débit en sec | | Débit (humide) | |
|----------------------|--------------|------|----------------|------|
| | t/h | % | t/h | % |
| Alimentation broyeur | 45,4 | 94,0 | 45,8 | 92,7 |
| Clinker | 36 | 74,5 | 36 | 72,9 |
| Calcaire | 7,4 | 15,3 | 7,8 | 15,8 |
| Gypse | 1,9 | 3,9 | 1,9 | 3,8 |
| Cendres volantes | 3 | 6,2 | 3 | 6,1 |
| Total entrant | 48,3 | 100 | 49,4 | 100 |

Table 11 : flux d'entrée du broyeur

2.3- Flux de sortie

| | Débit en sec | | Débit (humide) | |
|---------------|--------------|-------|----------------|------|
| | t/h | % | t/h | % |
| Ciment | 48,3 | 100,0 | 48,4 | 98,0 |
| humidité | - | 0,0 | 1 | 2,0 |
| Total sortant | 48,3 | 100 | 49,4 | 100 |

Table 12 : flux de sortie du broyeur

❖ **Remarque :**

On remarque que, pendant la période de l'audit, le circuit de la matière dans l'atelier a une dynamique normale. Ceci sans pertes ni accumulation de la matière dans le circuit.

Les résultats des différents bilans ont montré:

- Pour le broyeur, que la dynamique de la matière et de l'air est normale, les valeurs obtenues pour la vitesse (1,6m/s) ainsi que la différence de pression (107 mmH₂O) sont dans les intervalles recommandés.
- Quand au séparateur, la différence de pression obtenue (151 mmH₂O) est faible par rapport à la valeur envisagée ceci est du à la présence d'air faux qui fait que le séparateur est sous ventilé. Ceci sera éclairci par l'étude des performances du séparateur.
- En ce qui concerne le filtre, la valeur obtenue de la différence de pression montre que celle-ci est légèrement inférieure à la valeur tolérée chose qui est expliquée par le colmatage des manches. Ce constat est vérifié lors du contrôle visuel du filtre.

Pour expliquer les raisons d'être de ces résultats nous allons évaluer les performances des deux équipements critiques de l'atelier : le broyeur et le séparateur.

IV- Performances des équipements de l'atelier :

1- Broyeur :

1.1- Crash-stop:

Lors de la visite du broyeur, les remarques suivantes ont été faites :

- Conduite d'entrée déformée ;
- Boulets usés.
- Plaques de blindage usées et d'autres endommagées ;
- Fentes de diaphragme colmatées.
- Boulets enrobés au niveau de la 2^{ème} chambre.

Ces observations expliquent le pourcentage élevé d'air faux dans le broyeur (65,23%) déterminé par le bilan aéraulique. Aussi, les performances de blindage et des boulets sont limités vue la sollicitation accrue à laquelle ils sont sujet.

➤ Degré de remplissage

Le degré de remplissage est calculé par la méthode de nombre de plaques visibles ou par celle de la hauteur de vide. Pour le broyeur BK2, le calcul a montré que les deux compartiments sont remplis, respectivement, à 25% et 27%.

Ces valeurs sont faibles par rapport à la recommandation (30%). Cette diminution de degré de remplissage est expliquée par l'usure des corps broyant. Ce fait sera confirmé par l'étude de la distribution de la matière et de la charge broyante.

➤ **Distribution granulométrique de la matières:**

L'analyse granulométrique des échantillons que nous avons prélevés le long du broyeur selon le plan d'échantillonnage (figure 15) a donné les profils présentés ci-dessous.

On remarque que la distribution granulométrique le long du broyeur décroît graduellement de l'entrée à la sortie. Or, à la sortie de la 1^{ière} chambre, les particules dont le diamètre est supérieur à 10mm représente 1,6% alors que, à cet endroit, toute la matière doit avoir un diamètre inférieur à 10 mm, chose qui peut être due soit à l'insuffisance de la charge compatible avec les grosses particules ou à l'usure des boulets ou blindage. Aussi, à la sortie de ce premier compartiment, il y a présence de particules ultrafines. En effet, le $R_{0,5mm}$ est de 9,5% alors que son intervalle recommandé est entre 15%-25%, ceci peut être du à la sous ventilation du broyeur causée par la présence d'un taux important d'air faux.

Quant à la deuxième chambre, le profil de la distribution décroît de façon régulière et ne présente aucune particularité en ce qui concerne les refus de chaque maille. En revanche, seul 80% de la longueur du compartiment est utilisé pour le broyage (aplatissement des courbes à la sortie du compartiment). Les dimensions du broyeur sont donc non optimisées.

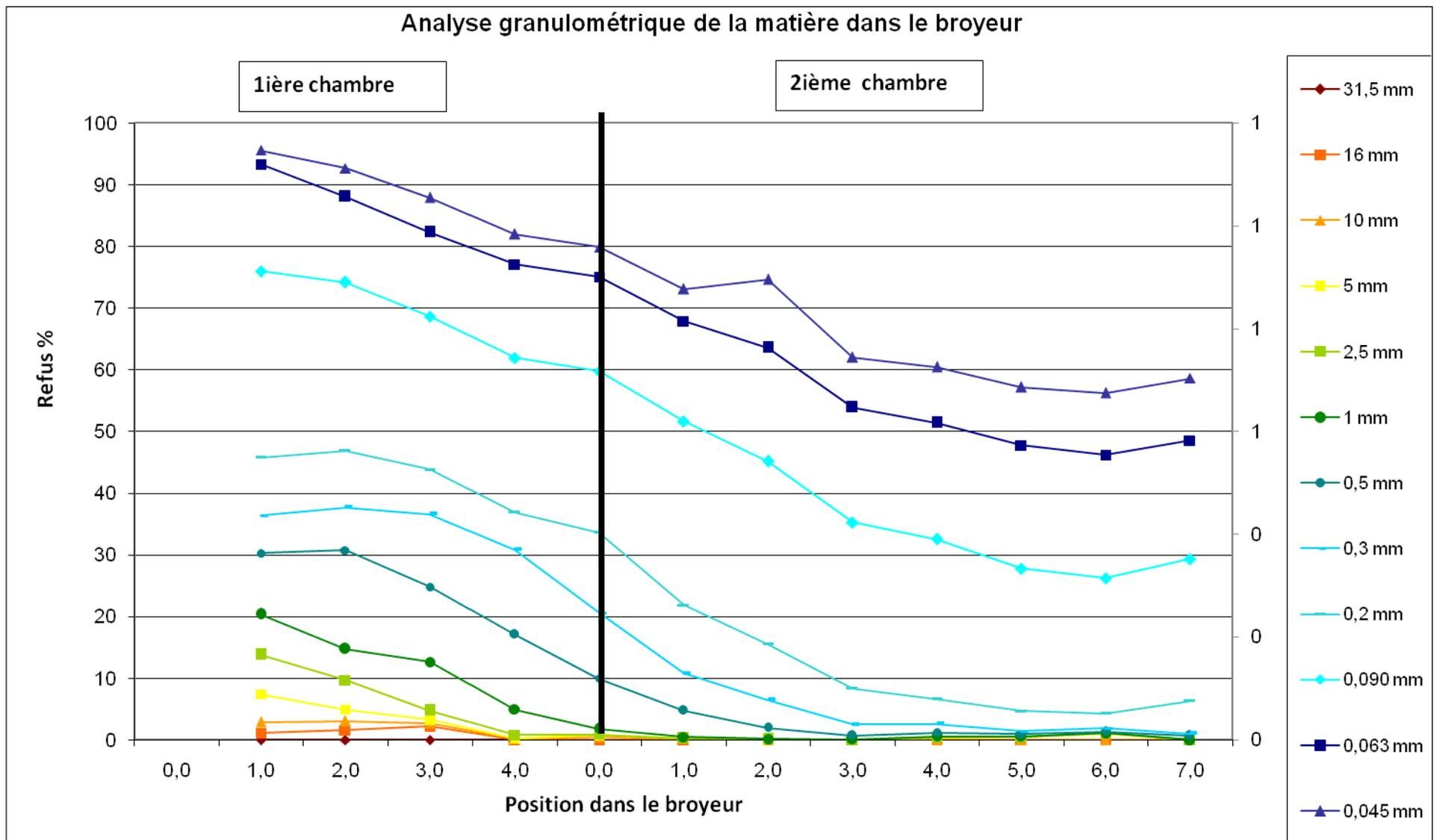


Figure 15 : l'analyse de granulométrie de la matière dans le broyeur



D

Distribution de la charge broyante

Les échantillons de la charge broyante que nous avons prélevés lors du crash-stop du broyeur ont fait l'objet des mesures du diamètre et du poids. Ainsi, la comparaison des pourcentages des différentes tranches de ces échantillons et de la charge mise en place par la société permet d'évaluer la distribution des corps broyants et sa compatibilité avec le profil granulométrique recherché. (**Annexe 6**)

-

1^{ère} chambre :

1

L'histogramme ci-dessous représente les résultats de distribution des boulets que nous avons trouvés pour le premier compartiment du broyeur :

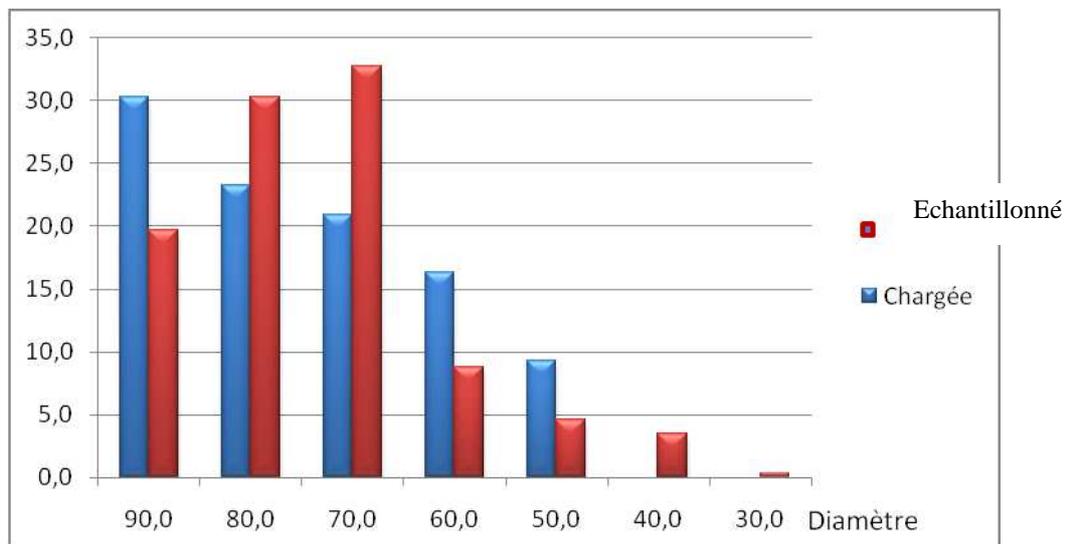


Figure 16 : Profil de la charge broyante dans le 1er compartiment



R

Remarque :

La comparaison entre les corps chargés et échantillonnés montre un écart d'environ 34%. En effet, les boulets de diamètre 90 mm lors du chargement étaient de 30,2% alors que pendant l'audit, ils ne présentent que 19,7%. Quant au pourcentage des boulets de diamètre 80 mm, il a augmenté de 23,3% à 30,3%. De même pour les boulets de diamètre 75 mm.

Or, au niveau de la 1^{ère} chambre, on remarque la présence de boulets de diamètre inférieur à 50mm, alors que cette tranche ne doit pas être présente à ce niveau.



I

Interprétation :

La diminution du pourcentage de boulets de diamètre 90 mm et 60 mm est due à l'usure de ceux-ci vue l'intensité des sollicitations auxquelles ils sont exposés. Ceci est confirmé par l'augmentation des pourcentages des boulets de diamètre 80 mm et la présence de boulets de diamètre inférieur à 50mm.

Ces valeurs expliquent la diminution de degré de remplissage au niveau du 1^{er} compartiment du broyeur.

- 2^{ème} chambre

Le profil que nous avons trouvé pour la seconde chambre n'échappe pas à la règle, et le phénomène d'usure est aussi important (figure ci-dessous)

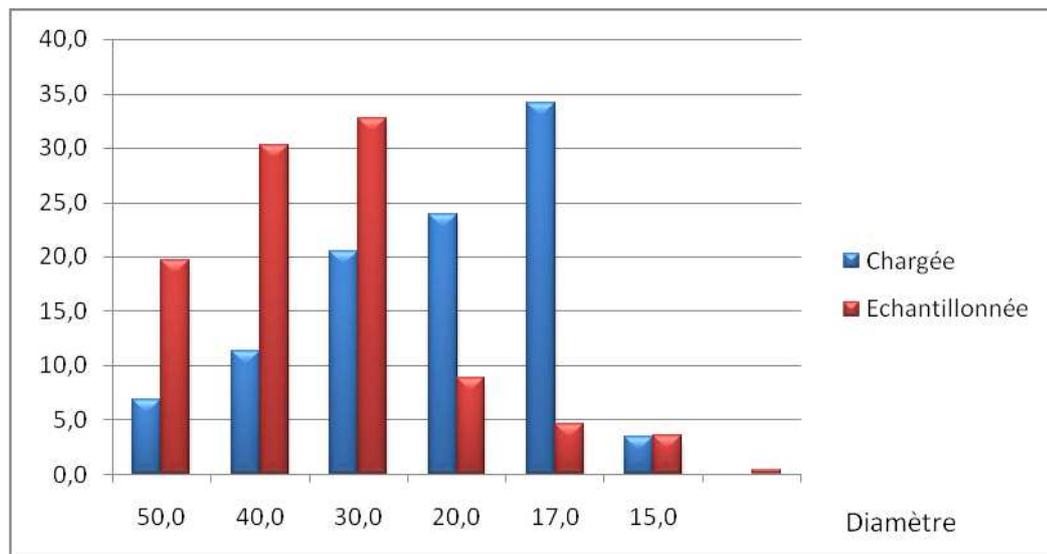


Figure 17 : distribution de la charge broyante dans la 2^{ème} chambre



R

Remarque :

On remarque, comme pour la 1^{ère} chambre, que le pourcentage des boulets échantillonné est 22% inférieur à celui chargé. D'autre part, le pourcentage des boulets de diamètre entre 45 et 35 mm est de 30,4%, une valeur importante par rapport à la quantité chargée qui est de 11,4%. On note aussi la présence de boulets de diamètre inférieur à 16mm avec un pourcentage de 0,2%.

Cette distribution des corps broyants fait que le degré de remplissage est inférieur à la consigne (jusqu'à 32%)



I

Interprétation:

Les observations faites sont expliquées par le phénomène d'usure qui a augmenté le taux des boulets de diamètre entre 55mm et 27mm. Les boulets de diamètre inférieur à 27mm sont sujets à une usure excessive.

D'après les résultats de la visite interne du broyeur, la charge broyante est très sollicitée, en particulier les boulets du diamètre 90 mm et ceux de diamètre entre 20 et 17 mm. En plus de l'usure importante des plaques de blindage et le colmatage des fentes et des lumières du diaphragme, la présence remarquable de la ferraille limitent la capacité du broyeur qui nécessite des actions d'amélioration.

2- Le séparateur :

2.1- Ratio de ventilation :

Le ratio de ventilation que nous avons calculé est de $1,4 \text{ kg/m}^3$ et qui est dans l'intervalle recommandé. De même pour le rapport entre le débit des fins au débit d'air entrant dans le séparateur qui est de $0,61 \text{ kg/m}^3$ et qui doit être inférieur à $0,7 \text{ m/s}$. la vitesse du rotor de séparateur est de $3,76 \text{ m/s}$, cette valeur est conforme puisqu'elle est dans l'intervalle recommandé ($<4\text{m/s}$).

2.2- Droite de Rosin Rammler:

L'analyse granulométrique du ciment obtenu par broyage dans l'atelier BK2 nous a permis de tracer la droite de Rosin_Rammler ci-dessous. (**Annexe 7**)

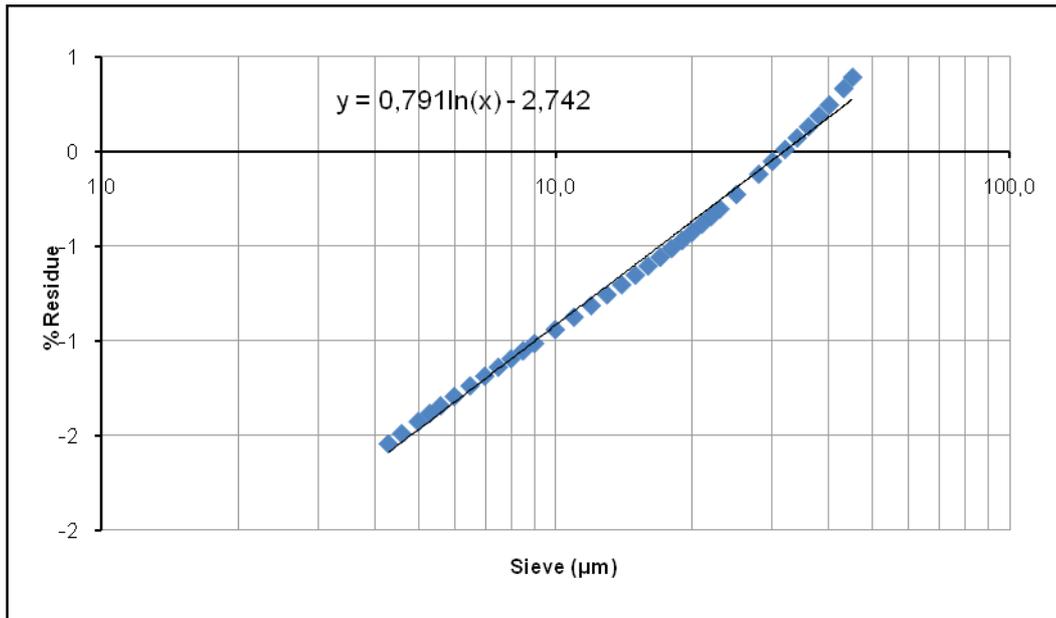


Figure 16 : Droite de Rosin_Rammler

La pente de la droite que nous avons trouvée est de 0,79. Cette valeur traduit une faible efficacité de séparation pour un séparateur de haute efficacité dont la valeur de la pente est >1.

2.3- Courbe de Tromp :

L'analyse laser des trois flux de matière de séparateur (**Annexe 7**) a permis de tracer la courbe de Tromp et d'en déduire les paramètres de performances du séparateur.

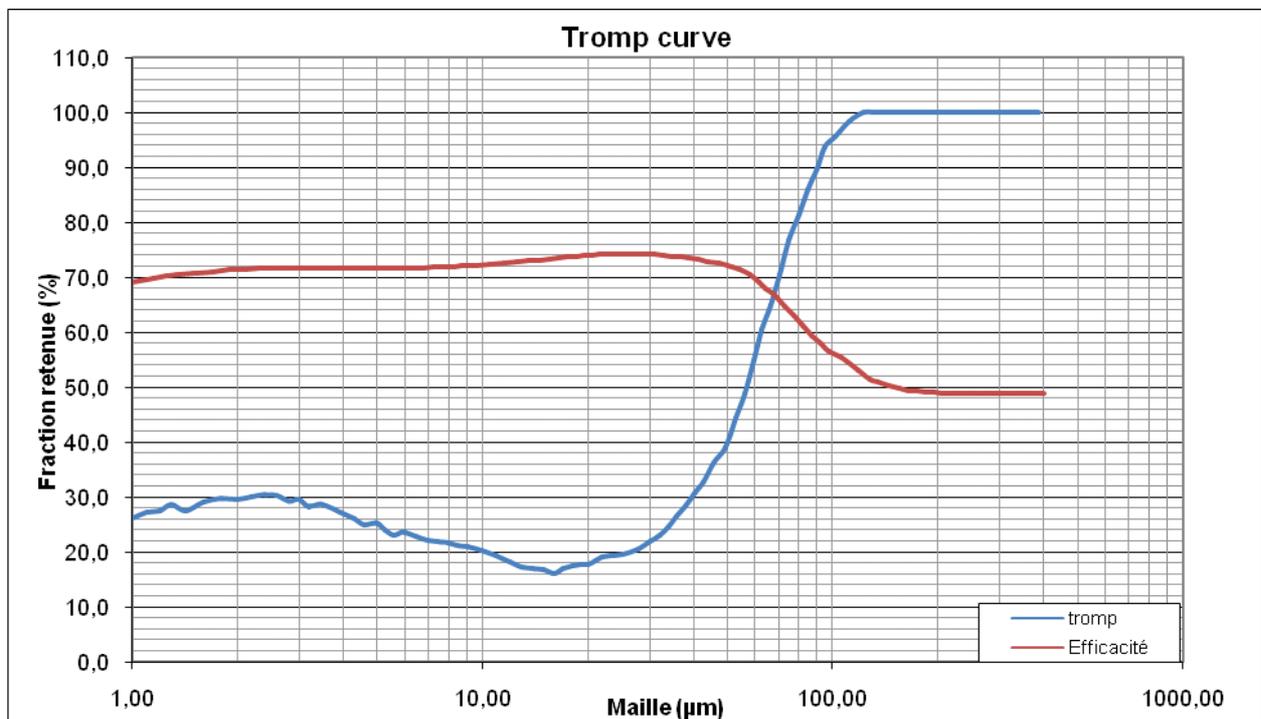


Figure 17 : courbes de Tromp et d'efficacité

De cette représentation on déduit :

- By-pass de 16% et qui doit être compris entre 5 et 10% ;
- Diamètre de coupure de $57\mu\text{m}$;
- Limite d'acuité de $17\mu\text{m}$ ($10-15\mu\text{m}$) ;
- Imperfection de 0,34 ($\sim 0,3$) ;
- Le rapport débit d'alimentation/débit d'air est de $1,25\text{Kg/m}^3$ ($< 2\text{Kg/m}^3$);
- La charge circulante moyenne est de 2,05.

Ces valeurs ainsi que la valeur de la pente Rosin_Rammler montrent que les performances du séparateur sont limitées par rapport à un séparateur de 3^{ième} génération et correspondent, cependant, à un séparateur de 2^{ième} génération.

V-Résultats de l'audit et plan d'action :

L'audit de l'atelier a conclu que l'atelier de broyage présente les anomalies suivantes :

- 1- Présence d'une quantité importante d'air faux dans l'atelier et en particulier au niveau du broyeur ;
- 2- Médiocrité des performances du séparateur ;
- 3- Degré de remplissage du broyeur faible;
- 4- Blindage usé ;
- 5- Lumières matées au niveau de la cloison;
- 6- Charge broyante usée et incompatible ;
- 7- Colmatage des manches du filtre ;

Tout ceci explique les performances moyennes de l'atelier et surtout celles du séparateur qui correspondent aux caractéristiques d'un séparateur de 2^{ième} génération.

En vue de remédier à ces anomalies nous avons proposé des actions d'amélioration qui concernent essentiellement :

| Equipement | Action d'amélioration |
|------------|--|
| Doseurs | <ul style="list-style-type: none">- Etalonner les doseurs du clinker et de calcaire ;- Augmenter la fréquence de calibrage ;- Vérifier les doseurs du gypse et des cendres volantes |
| Broyeurs | <ul style="list-style-type: none">- Réparer les conduites d'entrée et de sortie qui sont déformées ;- Remplacer les plaques de blindage usées ;- Nettoyer les fentes et les lumières colmatées ;- Contrôler l'état de la grille de ventilation ;- Eliminer la ferraille ;- Reconstruire la charge broyante selon un plan compatibles avec le profil granulométrique le long du broyeur ;- Réduire le pourcentage des boulets de diamètre 90mm ;- Augmenter le degré de remplissage pour une meilleure exploitation du broyeur |
| | <ul style="list-style-type: none">- Réparer les conduites du séparateur ;- Prévoir une visite du séparateur pour évaluer l'état des pales, du rotor et de la paroi ; |

| | |
|------------|--|
| Séparateur | <ul style="list-style-type: none">- Installer une grille à l'entrée du séparateur pour retenir la ferraille ;- Procédé au nettoyage automatique ou manuel de cette grille |
| Filtre | <ul style="list-style-type: none">- Augmenter la fréquence du cycle de nettoyage |

Table 13 : Actions d'amélioration

Chapitre IV

Contribution de l'ajout des agents de mouture sur les performances du broyage

Introduction :

Le broyage du clinker est une opération très 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 : c'est juste une nomenclature parce que les noms sont confidentielle) sur les performances du broyeur ainsi que sa contribution à l'amélioration du rapport C/K.

I- Agent de mouture :

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.



Boulets propres



Boulets enrobés

Ces deux phénomènes sont dus aux forces électrostatiques causées par les chocs boulet/boulet et boulet/blindage avec les particules. L'agglomération crée de grosses particules, ce qui influence 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 mouture agissent pour garder des surfaces propres de boulets et de blindage.

II- Influences des agents de mouture G et M au laboratoire :

1- Objectif de l'étude:

A ASMENT TEMARA, nous avons effectué des essais sur deux agents de mouture : GRACE et MAPEI. Ce sont deux composés organiques basiques en état liquide. Les essais menés au niveau de laboratoire ASMENT TEMARA ont pour but :

3. La détermination du débit optimal des deux adjuvants ;
4. L'évaluation de leurs effets sur la résistance ;
5. La détermination du gain encouru par l'utilisation des adjuvants via des essais industriels.

2- Méthodologie de travail :

Avant de préparer les échantillons pour déterminer l'effet des deux agents de moutures M et G il faut tout d'abord :

- ✓ Préparer la matière première ;
- ✓ Le matériel avec lequel on travaille ;

1.1- Matière première :

Pour préparer les échantillons au niveau laboratoire on a besoin de clinker, gypse, calcaire et agent de moutures.

1.1.1- Clinker :

Le clinker est l'élément essentiel de ciment, il résulte de la cuisson de la farine dans un four à environ 1450 °C, alors sa production cout très chère, c'est pour cela qu'il faut diminuer son pourcentage dans le ciment. Parmi les objectifs d'utilisation des agents de moutures est de diminuer la quantité de clinker, en gardant au ciment une résistance conforme à la norme.

Le clinker utilisé pour la préparation des échantillons est un clinker fabriquer à l'usine, il est prélever de refroidisseur, sa température étant prés de 200 °C. Après son refroidissement on a fait l'analyse granulométrie. **Annexe 7**. Après il est concasser dans un concasseur à mâchoire pour faciliter le broyage.

1.1.2- Calcaire :

Le calcaire est un élément parmi les additifs qui sont ajoutés pour réduire le taux de clinker dans le ciment

Le calcaire utilisé pour préparer les échantillons, est un calcaire venu de la carrière ASMENT TEMARA.

Les analyses granulométriques (**Annexe 7**) sont effectuées sur le calcaire prélevé du doseur de l'atelier de broyage BK2, puis le calcaire est concassé dans le concasseur à mâchoires.

1.1.3- Gypse :

Le gypse est une espèce minéral composé de sulfate dihydraté de calcium $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ajouté pour la fabrication de clinker avec un pourcentage de 3 à 5%, il joue le rôle d'un régulateur de prise.

Le gypse utilisé, est prélevé du doseur de l'atelier BK2, a fait l'objet d'une analyse granulométrique (**Annexe 7**) , puis concassé par le concasseur à mâchoires.

1.1.4- Agents de moutures :

On va étudier l'effet de deux agents de moutures sur la résistance de ciment, les caractéristiques et les compositions de ces deux élément sont des inconnus vu la confidentialité.

✓ M et G :

1.2- Matériel de travail :

On va utiliser un broyeur de type laboratoire pour la préparation des échantillons

1.2.1- Description du broyeur de type laboratoire GS 52 :

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.

| | |
|------------------------------|-------------------------|
| Granulométrie d'alimentation | 10 à 15 mm |
| Volume | 10 à 13 dm ³ |
| Vitesse de rotation nominale | 50 trs/ min |
| Capacité nominale | 50 l |

Table 14 : caractéristiques du broyeur de laboratoire

Il peut contenir 70 kg de boulets de diamètres différents, en acier spécial résistant à l'usure. Dans notre cas on va utiliser 67.3 kg de boulets qui correspond à un taux de remplissage de 30%. La distribution des boulets dans le broyeur sont comme suit :

| Diamètres des boulets | Pourcentage des boulets | Masse des boulets en kg |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| 60 mm | 10 | 6.73 |
| 40 mm | 20 | 13.46 |
| 30 mm | 20 | 13.46 |
| 25 mm | 20 | 13.46 |
| 20 mm | 30 | 20.19 |

Table 15 : distribution des boulets dans le broyeur

3- Influence des agents de mouture sur le ciment CPJ 45:

Pour déterminer le débit optimal de l'agent de mouture, nous avons mené plusieurs essais sur le ciment CPJ45 en faisant varier, pour les mêmes compositions de la matière première, le débit d'adjuvant. La cimenterie prend comme critère de contrôle la résistance à la compression de 28 jours, qui varie dans un intervalle précis pour chaque qualité de ciment (Norme). Ces essais ont donné le profil suivant de la résistance en fonction du débit des deux adjuvants. (**Annexe 8**)

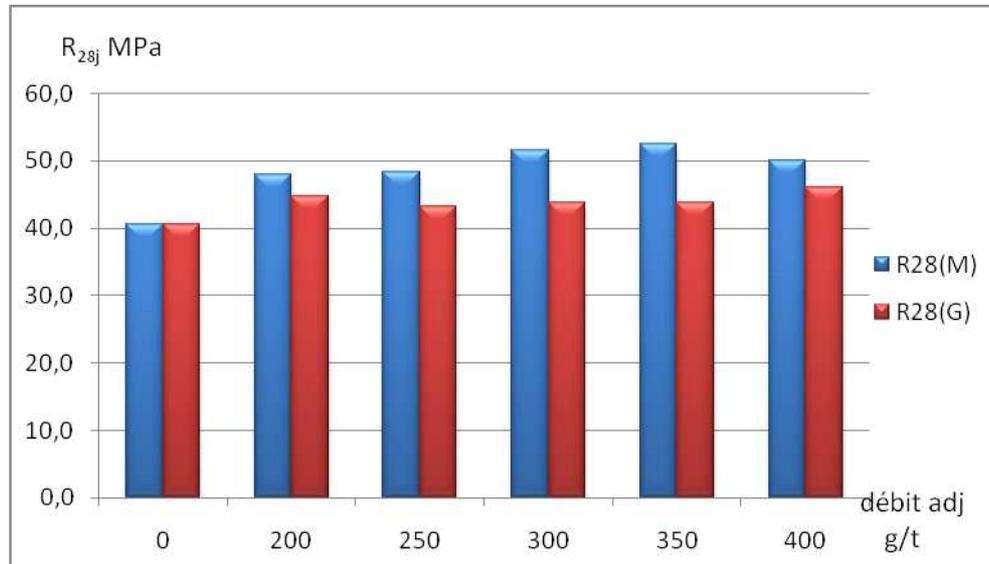


Figure 17: variation de R28j en fonction du débit d'adjuvant

On remarque que l'adjuvant MAPEI est beaucoup plus efficace, pour le CPJ45, que GRACE . En effet, la résistance évolue de manière importante pour l'adjuvant MAPEI jusqu'à une valeur de débit de 350 g/t où elle diminue. Quant à l'adjuvant GRACE, l'évolution de la résistance est très faible.

Après la détermination de l'optimum et de l'effet de chaque agent de mouture sur la résistance de ciment on a décidé de travailler avec l'agent de mouture MAPEI.

Pour un débit optimal 350g/t, on fait varier le pourcentage du clinker pour déterminer le gain qu'ASMENT TEMARA peu déduire suite à la diminution du taux de clinker utilisé. Ainsi, la variation de la résistance en fonction du taux du clinker utilisé se présente comme suit:

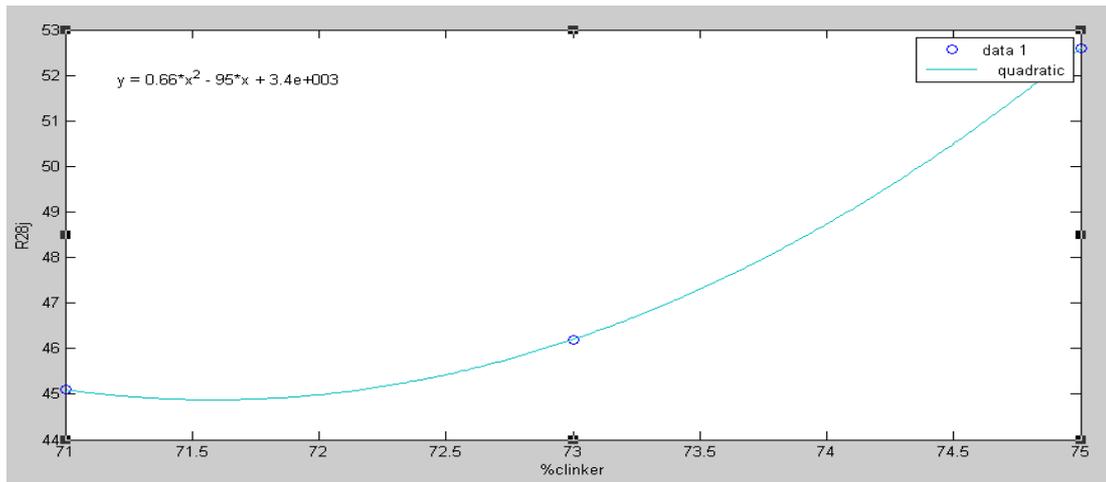


Figure 18: Effet de la diminution du % du clinker sur la résistance

On remarque que, malgré la diminution du pourcentage du clinker, la résistance à la compression de 28 jours reste dans la marge dictée par la norme en vigueur [$32,5 < R_{28j} < 55$ MPa]. Ceci permet de faire des économies en termes de quantité de clinker consommé soit de la consommation énergétique de l'atelier de broyage.

La variation de la résistance (R_{28j}) en fonction du pourcentage du clinker (x_2) suit la loi suivante avec un coefficient de corrélation de 1:

$$y = 0,66x_2^2 - 95x_2 + 3400$$

Pour évaluer les effets des agents de mouture sur les performances de l'atelier de broyage, on a effectué des essais au niveau industriel sur l'adjuvant M avec le débit déterminé par nos essais laboratoires.

4- Essais industriels de l'adjuvant M :

Après avoir déterminé le type et la quantité d'adjuvant à utiliser pour le CPJ 45 produit au niveau de l'atelier BK2, nous avons effectué des essais industriels durant le mois d'Avril. Les résultats obtenus, en comparaison avec les performances de l'atelier et la qualité du ciment sans adjuvant, sont présentés dans le tableau suivant :

| | Sans adjuvant | Avec adjuvant |
|---|---------------|---------------|
| Débit moyen t/h | 48.42 | 52.73 |
| Consommation électrique KWh/t | 32,86 | 31.2 |
| % clinker | 76,43 | 72,52 |
| % gypse | 4,61 | 4,9 |
| % calcaire | 18,96 | 22,58 |
| SO ₃ moyen | 2,4 | 2,55 |
| Refus sur 80µm | 3,58 | 3,01 |
| Refus sur 45µm | 25,12 | 20.14 |
| Résistance à la compression 2 jours (l Table 16 : marche de broyeur avec et sans agent de moutures | 14 | 13.9 |
| Résistance à la c (l | | |
| Résistance à la compression 28 jours (MPa) | 36.8 | 37.3 |

Ces résultats notent bien l'effet de l'agent de mouture sur la marche du broyeur. En effet, le débit du celui-ci a augmenté de 9%. Ceci a directement influencé la consommation électrique qui a diminué de 5%. Ce qui va diminuer le coût des opérations de fragmentation.

En cimenterie, c'est le clinker qui est le plus difficile à broyer. Ceci dit, l'introduction des agents de mouture à permet de diminuer le pourcentage du clinker utilisé tout en restant dans la gamme de résistance imposée par la norme. Un troisième effet de l'adjuvant M est lié à l'amélioration de la finesse qui est un paramètre important dans la résistance. En effet, le ciment réagit dans une tranche granulométrique allant de 3µm à 45 µm et l'adjuvant M a permet d'améliorer cette tranche.

L'analyse laser de deux échantillons (avec et sans adjuvant) a confirmé ce résultat (graphe ci-dessous). Les particules dont le diamètre est dans la tranche granulométrique intéressante présentent un pourcentage important par rapport au reste.

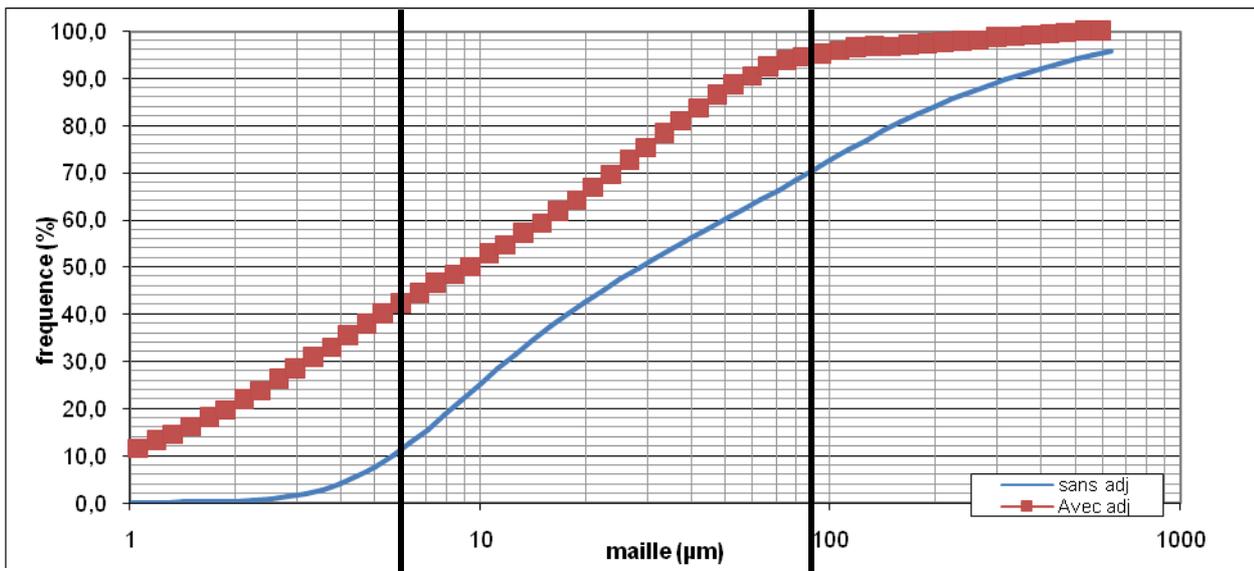


Figure 19: Impact de l'agent de mouture M sur la distribution granulométrique

Pour une maille de 3 μ m, l'agent de mouture a amélioré le passant de 40%. D'autre part, Il améliore l'hydratation de ciment qui est un processus complexe, constitué d'une combinaison de réactions chimiques, dans lequel les principaux composés du ciment C₃S, C₂S, C₃A, et C₄AF réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent la prise et le durcissement progressif du matériau. Raison pour laquelle l'ajout de l'agent de mouture M au ciment CPJ 45 pendant le gâchage a donné une résistance très élevée par rapport à celle du même ciment sans adjuvant.

| | CPJ 45 sans adjuvant | CPJ 45 avec adjuvant |
|---|----------------------|----------------------|
| Résistance à la compression 2 jours (MPa) | 14,6 | 16.9 |
| Résistance à la compression 7 jours (MPa) | 25.7 | 30.6 |
| Résistance à la compr 28 jours (MPa) | | |

Table 17 : résistance de CPJ 45 avec et sans agent de mouture

5- Evaluation du gain apporté par l'adjuvant MAPEI :

La réduction du pourcentage du clinker utilisé permet à ASMENT TEMARA de faire des économies importantes en termes de consommation énergétique. Le gain est déterminé par des mesures de la consommation énergétique avant et après l'utilisation des agents de mouture, et par l'augmentation de la capacité de production du broyeur.

5.1- Gain relatif à la consommation énergétique

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.

La consommation énergétique pendant la période d'essai de l'adjuvant dans le broyeur BK2 a présenté une diminution de 5% par rapport à la période de marche sans adjuvant. Le gain est comptabilisé par rapport au KWh consommé par le broyeur seul.

| | Sans adjuvant | Avec adjuvant |
|---------------------------------|---------------|---------------|
| Débit (t/h) | 48,4 | 52,7 |
| Production mensuelle (t) | 34862,4 | 37965,6 |
| Consommation broyeur (KWh) | 56440,7 | 30377,3 |
| Consommation spécifique (KWh/t) | 1,6 | 0,8 |
| Coût énergétique DH/t | 1,1 | 0,5 |
| Coût énergétique mensuel | 37284,7 | 20067,2 |

Table 18 : gain relatif à la consommation énergétique

Le gain annuel est de l'ordre de 20000,0 DH. En plus du gain en termes de consommation électrique, l'augmentation du débit de production apporte aussi une part importante au bénéfice.

5.2- Gain relatif au débit de production :

L'introduction des agents de mouture a permis de faciliter le processus de broyage ce qui a influencé la production du broyeur.

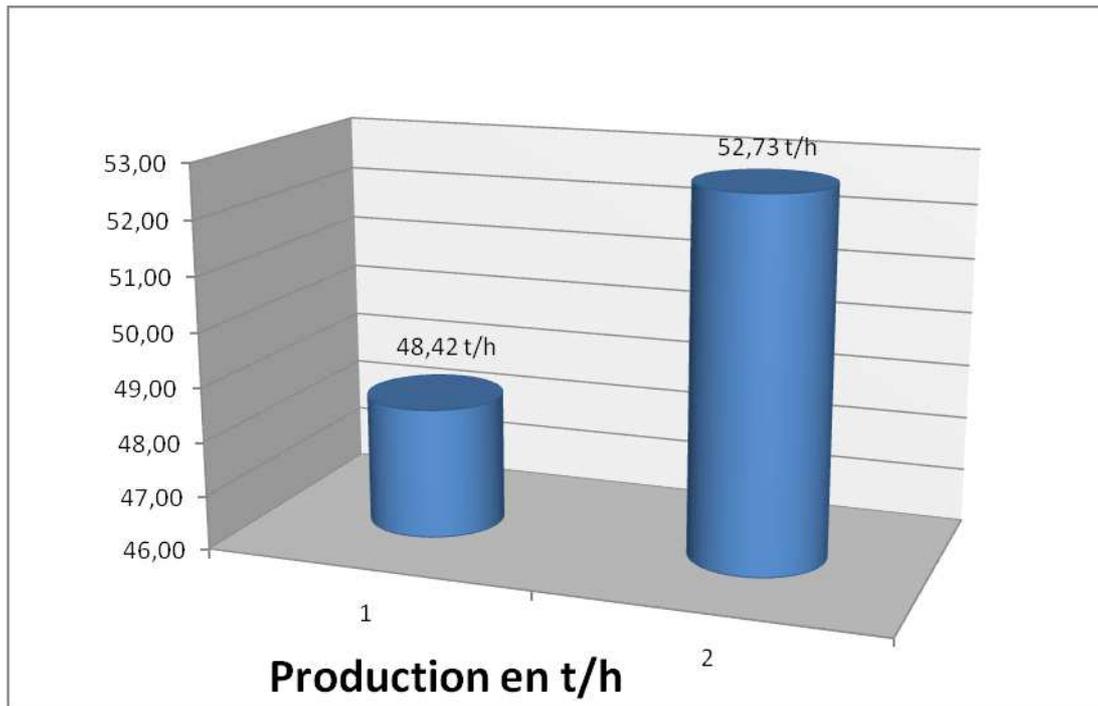


Figure 23 : production en t/h

Le prix du clinker, adjuvant et ciment sont résumés sur le tableau suivant :

| | Clinker | Adjuvant MAPEI | Ciment |
|-----------|---------|----------------|--------|
| Cout DH/t | 250 | 13 | 1200 |

Le tableau ci-dessous résume la contribution de l'agent de mouture à l'amélioration des performances de l'atelier de broyage et en particulier ceux du broyeur BK2.

| | Sans adjuvant | Avec adjuvant |
|-------------------------------------|---------------|---------------|
| Débit (t/h) | 48,42 | 52,73 |
| Production mensuelle (t) | 34862,4 | 37965,6 |
| % clinker | 0,7643 | 0,7252 |
| consommation mensuelle K (t) | 26645,33232 | 27532,65312 |
| consommation mensuelle adjuvant (l) | | 12096 |
| Coût clinker DH/mois | 6661333,08 | 6883163,28 |
| Coût adjuvant DH/mois | 0 | 157248 |

| | | |
|---------------------|-------------|-------------|
| C/K | 1.30 | 1.38 |
| Coût ciment DH/mois | 41834880 | 45558720 |
| Gain DH/mois | 35173546,92 | 38518308,72 |

Table 19: gain relatif à la production

L'utilisation de l'agent de mouture M pour la production du ciment CPJ45 apporte à ASMENT TEMARA un gain annuel de 40137141,6 DH.

Le bénéfice annuel total apporté par l'ajout des agents de mouture est :

B=40.137.141, 6 DH

CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail, C'est dans cette optique que s'inscrit mon projet de fin d'étude qui a pour objectif l'évaluation des performances de l'atelier de broyage ciment via établissement des différents bilans (aéraulique, matière, énergétique et thermique), évaluation de l'efficacité des opérations de broyage et de classification et l'étude de la contribution des agents de mouture à l'amélioration du ratio C/K d'ASMENT TEMARA.

Le bilan aéraulique et la visite de l'atelier ont conclut que l'atelier de broyage présente des anomalies liées à la présence d'une quantité importante d'air faux, en particulier, au niveau du broyeur et du séparateur ce qui influence leurs performances. En effet, la charge broyante ainsi que le blindage du broyeur étaient sujet à des sollicitations. Quant aux paramètres de séparateur, ils correspondent à un séparateur de 2^{ième} génération. Le filtre était aussi influencé par le colmatage de ses toiles filtrantes. Des actions d'amélioration ont été proposées pour remédier à ces dysfonctionnements.

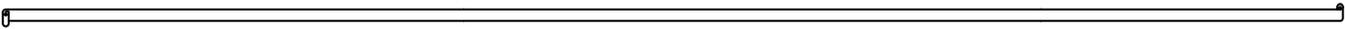
Concernant l'étude de l'impact des agents de mouture sur le broyage, la série d'essai que nous avons menée a permis une amélioration importante de la résistance du ciment et donc la

réduction du taux de clinker alimentant le broyeur. Les essais industriels effectués pour l'adjuvant choisi ont renforcé ce fait et le débit de production s'est amélioré de 8% à une consommation énergétique diminuée de 5%.

Pour pousser d'avantage cette étude nous avons proposé de faire d'autres essais sur les deux autres qualités du ciment (CPJ35 et CPJ55). Les résultats de cette étude permettront, en cas d'efficacité, de jouer sur le réglage du séparateur (débit d'air, vitesse de rotation du rotor et de la position des pales). Ce réglage sera établi en comparant les courbes de Tromp obtenues lors de l'ajout de ces adjuvants et celle obtenues sans adjuvants.

Bibliographie et références :

- http://www.chryso.com/upload/t_documents/Fichier_L1/42688/7565_DOC_CIMENT.pdf
- **La norme marocaine**
- **Thèse sur l'étude des modes d'action des agents de moutures sur le broyage du clinker.**
- **Document de l'entreprise ASMENT TEMARA.**



Annexes

Annexe 1

Données techniques BK2

2- Broyeur

| | |
|--------------------------------|--------|
| | BK2 |
| Année de mise en place | 1999 |
| Diamètre en m | 3,22 |
| Longueur utile en m | 10,875 |
| Débit garanti en t/h en humide | 52 |
| Puissance en KW | 1800 |

| | 1ière chambre | 2ème chambre |
|---------------------|---------------|--------------|
| Longueur utile (mm) | 3425 | 7450 |

| | | |
|---|----------------------|---------------------|
| Charge broyante (t) | 43 | 88 |
| Taille des boulets (mm) | 90- 50 | 40-17 |
| Type de blindage | Step ondulé relevant | Magotteaux classant |
| Diamètre de la grille (mm) | 500 | 850 |
| Lumière grille de sortie (mm) | 10 | 12 |
| Plaques de blindage par anneau | 34 | 34 |
| Diamètre de la goulotte d'alimentation (mm) | 1100 | / |
| Diamètre grille de sortie (mm) | / | 850 |
| Fente (mm) | 3220 | 3220 |

3- Moteur principal du broyeur

| | |
|---------------------------|-------|
| Voltage (V) | 5500 |
| Intensité (A) | 219,8 |
| Puissance (KW) | 1800 |
| Vitesse de rotation (rpm) | 990 |
| Fréquence (Hz) | 50 |
| Cos φ | 0,9 |

- Séparateur

| | |
|----------------------------------|----------|
| Type | TSV 2800 |
| Diamètre de rotor (mm) | 1950 |
| Hauteur du rotor (mm) | 1020 |
| Débit nominal d'air (m3/h) | 64 600 |
| Débit d'air de séparation (m3/h) | 92 900 |
| Puissance KW | 45 |

- Filtre

| | |
|------|------------------|
| Type | Filtre à manches |
|------|------------------|

| | |
|----------------------------|-------|
| Débit (Nm ³ /h) | 82500 |
| Température maximale (°C) | 80 |

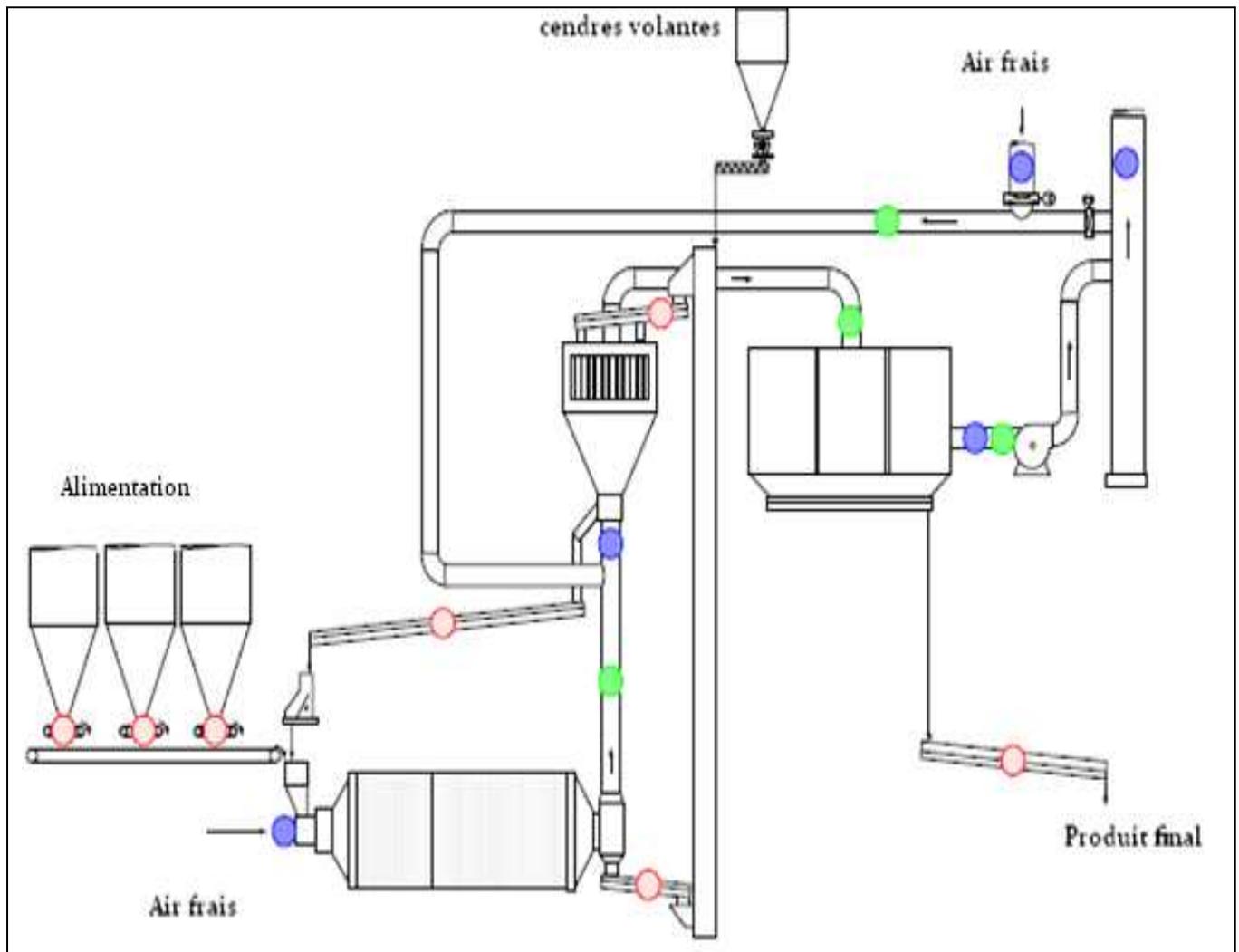
- Ventilateur

| | |
|---------------------------|--------|
| Débit (m ³ /h) | 90 000 |
| Température (°C) | 80 |
| Pression statique (mbar) | 60 |

- Diamètres des conduites BK2 (en mm)

| | |
|------------------------------|------|
| Entrée séparateur | 1370 |
| Entrée ventilateur de tirage | 1125 |
| Cheminée sortie | 1485 |
| Entrée BK2 air frais | 1000 |
| Gaine de recirculation | 995 |

Annexe 2



- Echantillonnage de la matière
- Mesure de débit
- Mesure de la température et de la pression

Annexe 3

Principe de mesure par tube de Pitot

Le tube de Pitot permet la détermination de la vitesse locale d'un flux d'air. On en distingue deux classes de tube :

- Tube de Pitot de type S pour les gaz chargés
- Tube de Pitot de type L pour les gaz non chargés ;

La vitesse est déterminée grâce à la mesure d'une différence entre la pression statique P_s et la pression totale P_t . Le physicien Darcy le compléta, permettant ainsi la mesure simultanée des deux pressions totale et statique.

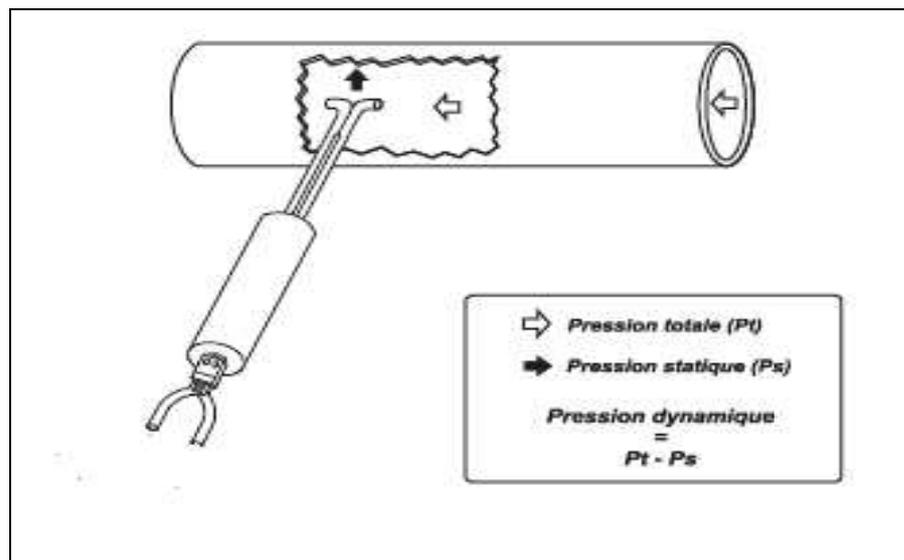
En fluide incompressible, l'équation de Bernoulli nous donne une expression de la pression totale au point d'arrêt du tube (vitesse nulle en ce point) :

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

On en déduit alors la vitesse du fluide dans laquelle évolue la sonde de Pitot :

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

Le principe de fonctionnement du tube est illustré sur la figure ci-dessous



Annexe 4

La visite interne du broyeur





Plaques de blindage cassées

Boulets déformés

Distribution de la charge broyante

- 1^{ère} chambre

1

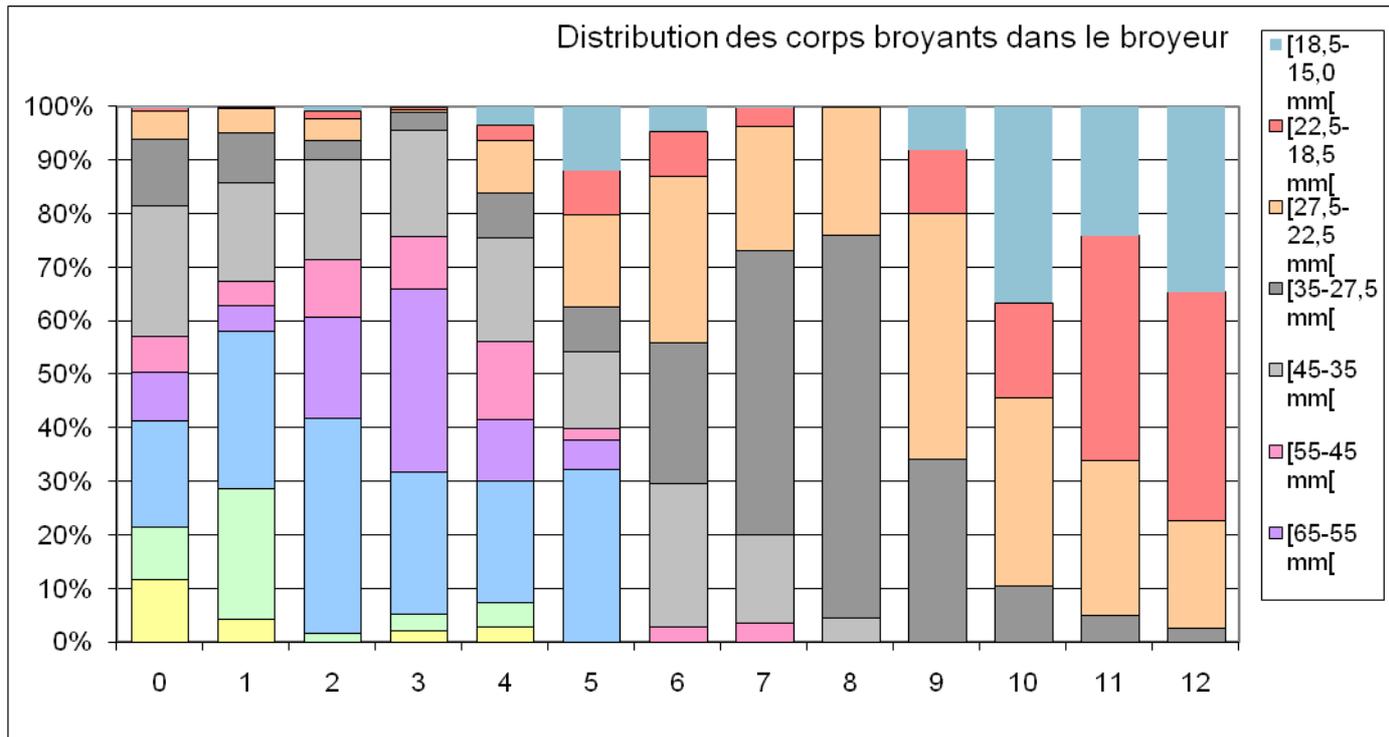
| 1 ^{ère} chambre | Originale | | Chargée | | Echantillonnée | | Proposée | |
|--------------------------|-----------|----|---------|----|----------------|-----|----------|------|
| | % | t | % | t | % | t | % | t |
| [95-85[| 33,3 | 13 | 30,2 | 13 | 19,7 | 5,6 | 27,0 | 10,4 |

| | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-------------|------------|-------------|
| [85-75[| 30,8 | 12 | 23,3 | 10 | 30,3 | 8,6 | 33,0 | 12,7 |
| [75-65[| 17,9 | 7 | 20,9 | 9 | 32,7 | 9,3 | 20,0 | 7,7 |
| [65-55[| 17,9 | 7 | 16,3 | 7 | 8,8 | 2,5 | 20,0 | 7,7 |
| [55-45[| - | - | 9,3 | 4 | 4,6 | 1,3 | - | - |
| [45-35[| - | - | - | - | 3,5 | 1 | - | - |
| [35-27,5[| - | - | - | - | 0,4 | 0,1 | - | - |
| Total | 100 | 39 | 100 | 43 | 100 | 28,4 | 100 | 38,5 |
| Boulet déformé | - | - | - | - | 5,58 | - | - | - |
| Degré de remplissage % | 32,6 | | 35,8 | | 24,3 | | 32,2 | |
| surface spécifique m2/t | 10,1 | | 10,6 | | 10,8 | | 10,2 | |
| Diamètre moyen mm | 78,0 | | 75,0 | | 74,0 | | 77,0 | |

• 2^{ème} chambre

2

| 2 ^{ème} chambre | Originale | | Chargée | | Echantillonnée | | Proposée | |
|--------------------------------|------------|-----------|--------------|-----------|----------------|-------------|------------|-------------|
| | % | t | % | t | % | t | % | t |
| [55-45[| 8 | 7,2 | 6,8 | 6 | 19,7 | 5,6 | 8,0 | 7 |
| [45-35[| 11 | 9,9 | 11,4 | 10 | 30,4 | 8,6 | 9,9 | 8,7 |
| [35-27,5[| 18 | 16,2 | 20,5 | 18 | 32,8 | 9,3 | 20,0 | 17,5 |
| [27,5-22,5[| 24 | 21,6 | 23,9 | 21 | 8,7 | 2,5 | 25,0 | 21,9 |
| [22,5-18,5[| 24 | 21,6 | 34,1 | 30 | 4,5 | 1,3 | 37,0 | 32,4 |
| [18,5-16,5[| 15 | 13,5 | 3,4 | 3 | 3,6 | 1 | - | - |
| <16 | - | - | - | - | 0,2 | 0,1 | - | - |
| Total | 100 | 90 | 100,0 | 88 | 99,9 | 28,4 | 100 | 87,5 |
| Boulet déformé | - | - | - | - | 10,1 | - | - | - |
| Degré de remplissage | 32,9 | | 32,2 | | 25 | | 32 | |
| surface spécifique m2/t | 31,3 | | 30,3 | | 29,9 | | 30,1 | |
| Diamètre moyen mm | 27 | | 27 | | 28 | | 28 | |



Annexe 6

Analyse granulométrique des trois flux du séparateur

| Maille μm | Analyse laser Refus cumulé % | | | Maille μm | Analyse laser Refus cumulé % | | | Maille μm | Analyse laser Refus cumulé % | | |
|----------------------|------------------------------|-------|-------|----------------------|------------------------------|-------|-------|----------------------|------------------------------|-------|-------|
| | a_i | r_i | f_i | | a_i | r_i | f_i | | a_i | r_i | f_i |
| 400,0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 45,0 | 48,06 | 75,33 | 22,82 | 5,3 | 84,84 | 90,78 | 77,79 |
| 355,0 | 0 | 0,08 | 0,00 | 43,0 | 49,59 | 76,44 | 24,84 | 5,0 | 85,40 | 91,03 | 78,62 |
| 300,0 | 0 | 0,37 | 0,00 | 38,0 | 53,36 | 78,74 | 29,94 | 4,3 | 86,84 | 91,71 | 80,73 |
| 280,0 | 0 | 0,60 | 0,00 | 36,0 | 54,88 | 79,54 | 32,03 | 4,0 | 87,51 | 92,04 | 81,71 |
| 250,0 | 0 | 1,13 | 0,00 | 34,0 | 56,41 | 80,29 | 34,18 | 3,8 | 87,99 | 92,29 | 83,41 |
| 240,0 | 0 | 1,37 | 0,00 | 32,0 | 57,97 | 80,99 | 36,41 | 3,6 | 88,48 | 92,55 | 83,13 |
| 200,0 | 0,12 | 2,90 | 0,00 | 25,0 | 63,84 | 83,29 | 45,08 | 3,0 | 90,09 | 93,43 | 85,48 |
| 190,0 | 0,23 | 3,52 | 0,00 | 23,0 | 65,63 | 83,93 | 47,81 | 2,8 | 90,66 | 93,77 | 86,32 |
| 180,0 | 0,40 | 4,32 | 0,00 | 22,0 | 66,53 | 84,25 | 49,20 | 2,6 | 91,26 | 94,12 | 87,20 |
| 170,0 | 0,69 | 5,36 | 0,00 | 21,0 | 67,43 | 84,57 | 50,61 | 2,4 | 91,88 | 94,50 | 88,11 |
| 160,0 | 1,12 | 6,71 | 0,00 | 20,0 | 68,33 | 84,88 | 52,04 | 2,2 | 92,51 | 94,89 | 89,04 |
| 150,0 | 1,76 | 8,45 | 0,00 | 19,0 | 69,25 | 85,18 | 53,49 | 2,0 | 93,16 | 95,29 | 90,01 |
| 140,0 | 2,69 | 10,70 | 0,00 | 18,0 | 70,16 | 85,48 | 54,94 | 1,8 | 93,83 | 95,69 | 91,00 |
| 130,0 | 4,04 | 13,66 | 0,00 | 17,0 | 71,08 | 85,78 | 56,42 | 1,6 | 94,50 | 96,10 | 92,01 |
| 125,0 | 4,91 | 15,46 | 0,00 | 16,0 | 72,00 | 86,07 | 57,90 | 1,4 | 95,18 | 96,50 | 93,03 |
| 100,0 | 11,68 | 28,96 | 0,12 | 14,0 | 73,90 | 86,65 | 60,95 | 1,2 | 95,87 | 96,89 | 94,07 |
| 95,0 | 13,69 | 32,70 | 0,30 | 13,0 | 74,89 | 86,96 | 62,53 | 1,1 | 96,21 | 97,08 | 94,59 |
| 90,0 | 15,97 | 36,77 | 0,58 | 12,0 | 75,92 | 87,29 | 64,17 | 1,0 | 96,56 | 97,27 | 95,12 |
| 85,0 | 18,60 | 41,14 | 1,10 | 11,0 | 77,00 | 87,65 | 65,87 | 0,9 | 96,91 | 97,45 | 95,65 |
| 80,0 | 21,55 | 45,73 | 1,87 | 10,0 | 78,13 | 88,06 | 67,66 | 0,8 | 97,26 | 97,62 | 96,18 |
| 75,0 | 24,83 | 50,46 | 2,99 | 9,0 | 79,35 | 88,52 | 69,54 | 0,7 | 97,60 | 97,80 | 96,70 |
| 71,0 | 27,65 | 54,30 | 4,20 | 8,5 | 79,99 | 88,77 | 70,52 | 0,6 | 97,94 | 97,97 | 97,19 |
| 60,0 | 36,12 | 64,40 | 9,60 | 7,0 | 82,06 | 89,60 | 73,66 | 0,3 | 98,95 | 98,74 | 98,63 |



Annexe 7 :

Analyse granulométrie de la matière :

| clinker | | | |
|---------------------------|-------------------------|---------------|------------------|
| OUVERTURES TAMIS en mm | POIDS DES REFUS en g | REFUS en % | REFUS CUMULES |
| > 50,00 mm | 0 | 0,00 | 0,00 |
| > 31,50 mm | 623 | 7,14 | 7,14 |
| > 25 mm | 795 | 9,11 | 16,24 |
| > 16,00 mm | 798 | 9,14 | 25,38 |
| > 12,50 mm | 1698 | 19,45 | 44,83 |
| > 10,00 mm | 1569 | 17,97 | 62,80 |
| > 5,00 mm | 1982 | 22,70 | 85,50 |
| > 03,15 mm | 1266 | 13,50 | 97,66 |
| < 03,15 mm | 126 | 1,44 | 100,00 |
| TOTAL | 8731 | 100,00 | / |

| calcaire | | | |
|---------------------------|-------------------------|---------------|------------------|
| OUVERTURES TAMIS en mm | POIDS DES REFUS en g | REFUS en % | REFUS CUMULES |
| > 50,00 mm | 0 | 0,00 | 0,00 |
| > 31,50 mm | 333 | 2,20 | 2,20 |
| > 25 mm | 1073 | 7,10 | 9,30 |
| > 16,00 mm | 676 | 4,47 | 13,77 |
| > 12,50 mm | 648 | 4,28 | 18,05 |
| > 10,00 mm | 622 | 4,11 | 22,16 |
| > 5,00 mm | 1306 | 8,64 | 30,80 |
| > 03,15 mm | 888 | 5,87 | 36,67 |
| < 03,15 mm | 9576 | 63,33 | 100,00 |
| TOTAL | 15121 | 100,00 | / |

| gypse | | | |
|---------------------------|-------------------------|---------------|------------------|
| OUVERTURES TAMIS en mm | POIDS DES REFUS en g | REFUS en % | REFUS CUMULES |
| > 50,00 mm | 2147 | 18,43 | 18,43 |
| > 31,50 mm | 3108 | 26,67 | 45,09 |
| > 25 mm | 1838 | 15,77 | 60,86 |
| > 16,00 mm | 532 | 4,56 | 65,43 |
| > 12,50 mm | 352 | 3,02 | 68,44 |
| > 10,00 mm | 334 | 2,86 | 71,31 |
| > 5,00 mm | 739 | 6,34 | 77,64 |
| > 03,15 mm | 360 | 3,09 | 80,73 |
| < 03,15 mm | 2246 | 19,27 | 100,00 |
| TOTAL | 11655 | 100,00 | / |



Annexe 8

- Essai de l'adjuvant M pour CPJ 45 :

| Composition | | | | Débit Adjuvant en (g/t) | ESSAIS MECANIKES | | | | | |
|-------------|-----------|--------------------|---------|-------------------------|------------------|-----|-----|-------------------|------|------|
| Clinker (%) | Gypse (%) | Calcaire ajout (%) | C.V (%) | | Flexion (MPa) | | | compression (MPa) | | |
| | | | | | 2j | 7j | 28j | 2j | 7j | 28j |
| 75,00 | 5,00 | 20,00 | 0,00 | 0 | 4,0 | 6,2 | 7,7 | 18,3 | 31,1 | 40,6 |
| 75,00 | 5,00 | 20,00 | 0,00 | 200 | 4,7 | 6,3 | 8,0 | 19,6 | 33,3 | 47,9 |
| 75,00 | 5,00 | 20,00 | 0,00 | 250 | 4,8 | 6,4 | 8,3 | 20,4 | 34,3 | 48,3 |
| 75,00 | 5,00 | 20,00 | 0,00 | 300 | 4,7 | 6,8 | 8,1 | 21,9 | 37,8 | 51,5 |
| 75,00 | 5,00 | 20,00 | 0,00 | 350 | 5,0 | 6,9 | 8,3 | 23,9 | 38,2 | 52,6 |
| 75,00 | 5,00 | 20,00 | 0,00 | 400 | 4,4 | 6,1 | 8,0 | 19,6 | 34,6 | 50,1 |

- Essai de l'adjuvant G pour CPJ 45 :

| Composition | | | | Débit Adjuvant en (g/t) | ESSAIS MECANIKES | | | | | |
|-------------|-----------|--------------------|---------|-------------------------|------------------|------|------|-------------------|-------|-------|
| Clinker (%) | Gypse (%) | Calcaire ajout (%) | C.V (%) | | Flexion (Mpa) | | | compression (MPa) | | |
| | | | | | 2j | 7j | 28j | 2j | 7j | 28j |
| 75,00 | 5,00 | 20,00 | 0,00 | 0,00 | 4,00 | 6,20 | 7,70 | 18,30 | 31,10 | 40,60 |
| 75,00 | 5,00 | 20,00 | 0,00 | 200,00 | 4,70 | 5,70 | 7,50 | 19,40 | 31,95 | 43,75 |
| 75,00 | 5,00 | 20,00 | 0,00 | 250,00 | 4,30 | 5,40 | 7,40 | 17,20 | 29,70 | 43,15 |
| 75,00 | 5,00 | 20,00 | 0,00 | 300,00 | 3,90 | 6,00 | 7,50 | 17,50 | 30,90 | 43,80 |
| 75,00 | 5,00 | 20,00 | 0,00 | 350,00 | 3,80 | 5,50 | 7,50 | 18,20 | 32,00 | 43,80 |
| 75,00 | 5,00 | 20,00 | 0,00 | 400,00 | 3,90 | 5,90 | 7,75 | 19,60 | 33,30 | 43,80 |

