



Licence Sciences et Techniques (LST)

GENIE CHIMIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

EFFET DE LA GRANULOMETRIE SUR LA QUALITE D'ANALYSE DU CRU

Présenté par :

♦ BENMANSOUR Mohammed Reda

Encadré par :

♦ Mr AYADI Abdelaziz (HOLCIM)

♦ Pr MOUGHAMIR Khadija (FST)

Soutenu Le 15 Juin 2015 devant le jury composé de:

- Pr A MELIANI (FST)

- Pr A.KANDRI RODI (FST)

- Pr K. MOUGHAMIR (FST)

Stage effectué à HOLCIM RAS EL MA

Année Universitaire 2014 / 2015

Dédicace

A mes parents,

En reconnaissance des sacrifices qu'ils ont toujours consentis pour moi, de leurs encouragements, leurs soutiens, et de leur aide morale et matérielle permanentes. Que ce modeste travail soit pour eux un témoignage de mon infini respect et mon profond amour.

A mes sœurs,

Avec tout l'amour que je les portes en témoignage de l'affection que je l'ai toujours réservées, j'espère qu'elles trouvent à travers ce travail l'expression de mes sentiments les plus chaleureux.

A ma famille, et mes amis

Aucune dédicace ne saurait vous exprimer mon grand attachement, vous trouverez ici la reconnaissance pour tous les services que vous avez pu me rendre.

A tous ceux qui ont très chers.

Merci à vous tous.

Remerciement

Il est agréable de m'acquitter d'une dette de reconnaissance auprès de toutes les personnes, dont l'intervention au cours de ce projet, a favorisé son aboutissement.

Ainsi, je tiens à remercier tout le personnel de HOLCIM, pour son soutien et pour sa générosité considérable quant à l'offre de l'information.

Mes très chers remerciements vont à **Mr. AYADI** mon encadrant au sein de HOLCIM, qui n'as pas manqué de me préparer les conditions favorables au bon déroulement du projet.

_ Mes remerciements les plus sincères vont aussi au **Pr. MOUGHAMIR Khadija** mon encadrante à la FSTF, pour les conseils qu'elle m'a prodiguées, son judicieux encadrement ainsi que son assistance pour la rédaction du rapport.

_ Je tiens également à adresser mes plus sincères remerciements aux membres de jury **Pr A.KANDRI RODI et Pr. A Meliani**, d'avoir accepté de juger mon travail et pour leur disponibilité et leur attention.

Enfin, que tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail trouvent l'expression de mes remerciements les plus chaleureux.

SOMMAIRE :

Introduction	1
---------------------	----------

Chapitre I	Aperçus sur la cimenterie HOLCIM Maroc	2
-------------------	---	----------

I- Aperçus sur la cimenterie HOLCIM Maroc	3
--	----------

I-1 Présentation de la société HOLCIM	...3
I-2 Historique de HOLCIM Maroc	4
I-3 Activités principales	.5
I-4 Cadre juridique	...5
I-5 Situation de la cimenterie HOLCIM dans le marché national	..6
I-6 Organigramme de HOLCIM Maroc RAS EL MA	..6

II-1 Généralité sur le ciment	7
--------------------------------------	----------

II-1.1 Historique du ciment	.7
II-1.2 Qu'est ce qu'un ciment ?	7
II-1.3 Matières premières	...8
II-1.4 Les ajouts	..8

II-2 Production	9
------------------------	----------

II-2.1 Procédé de fabrication du ciment	..9
II-2.2 Différentes voies de fabrication du ciment	10
II-2.3 Les étapes principales de fabrication du ciment	.11

II-3 Contrôle de qualité des produits cimentiers	17
---	-----------

II-3.1 Les essais chimiques	...18
a- Analyse par spectromètre de fluorescence à rayon X	...18
b- La perte au feu (P.A.F)	..18
II-3.2 Les essais physiques	...19
A- La prise	19
b- Essais de flexion et de compression	.19
c- La finesse	.20

Chapitre II	Effet de la granulométrie (broyage) sur la qualité d'analyse du cru	22
--------------------	--	-----------

Problématique de sujet	.23
II-Effet de la granulométrie sur la qualité d'analyse	..23

II-1 Le Crû et ses Proportions en matières premières	23
II-1.1 Le cru	23
II-1.2 Proportions des matières premières dans le crû	23
a-LSF : Lime Saturation Factor (Facteur de saturation en chaux)	23
b-Module Silicique (MS)	24
c-Module Alumino-Ferrique (MAF)	24
II-2 Impact de l'effet inter éléments	24
II-2.1 Analyses du crû selon trois méthodes	24
II-2.2 résultats	26
II-2.3 Interprétation des résultats obtenus	27
II-3 Temps de broyage (3min)	28
II-3.1 résultats	28
II-3.2 Interprétation des résultats obtenus	29
<u>Conclusion.....</u>	30

Liste des figures et tableaux :

- Les Figures :

Figure 1 : HOLCIM RAS EL MA.

Figure 2 : HOLCIM avant et après.

Figure 3 : Organigramme de l'organisation HOLCIM RAS EL MA.

Figure 4 : Vue générale du site.

Figure 5 : L'extraCTION.

Figure 6 : Le concassage.

Figure 7 : Cellule de dépoussiérage.

Figure 8 : La tour (préchauffeurs).

Figure 9 : Four de cuisson.

Figure 10 : Le système de préchauffage, cuisson et refroidissement.

Figure 11 : Broyeur à boulets.

Figure 12 : Broyeur à galets.

Figure 13 : Le stockage et l'expédition du ciment.

Figure 14 : Spectroscopie à fluorescence X.

Figure 15 : Four à moufle.

Figure 16 : L'aiguille de Vicat.

Figure 17 : Presse de flexion et compression des moules de béton.

Figure 18 : Tamiseur à courant d'air.

Figure 19 : Sur-Broyeur (HERZOG) et Bol en carbure de tungstène (assiette).

Figure 20 : Presse à Pastille.

Figure 21 : Résultats d'analyse du cru.

Figure 22 : Courbes des principaux composants du cru broyé pendant différentes durées.

Figure 23 : Analyses de SiO_2 dans le cru broyé pendant différentes durées.

- Les Tableaux :

Tableau 1 : Résultats d'analyse du cru selon trois méthodes.

Tableau 2 : Résultats d'analyses pour différents temps de broyage.

Liste des abréviations

- CIMA : La Cimenterie Maghrébine.
- SNMC : La Société Nationale des Matériaux de Construction.
- CIOR : La Cimenterie de l'Occidental.
- REM : Ras El Ma.
- CPJ : Ciment Portland avec ajouts.
- PGNA : *Prompt-gamma neutron activation analysis* (analyse instantané par activation neutronique).
- XRF : X-ray fluorescence (Fluorescence à rayon X).
- P.A.F : Perte au feu.
- LSF : Lime Saturation Factor (Facteur de saturation en chaux).
- MS : Module Silicique
- MAF : Module Alumino-Ferrique.

Introduction

Ce projet de fin d'étude m'a permis de transformer ma formation théorique à une application dans la pratique. Dans cet esprit vient mon stage au sein de la société HOLCIM Maroc, et qui était une meilleure occasion pour mieux se familiariser avec le monde industriel et une bonne opportunité pour appliquer ce qu'on a acquis à la faculté.

L'industrie mondiale du ciment se focalise de plus en plus sur le perfectionnement de la productivité par la minimisation des coûts de fabrication du clinker (produit semi-fini) et du ciment tout en maintenant la qualité du produit final.

Ce perfectionnement est concrétisé par l'utilisation d'outils de production plus performants et par un suivi continu et constant de la qualité des produits fabriqués. Une autre démarche consiste à améliorer la composition du mélange de matières premières.

Pour fabriquer le meilleur clinker ou ciment possible et dans les meilleures conditions de marche, il faut donc un cru adapté chimiquement aux objectives qualités, et suffisamment régulier pour que la cuisson dans le four soit elle-même stable et régulière.

Fabriquer un bon cru demande la mise en œuvre des moyens, des techniques d'analyses, des objectives qualités et l'organisation du contrôle.

Ainsi et pour maîtriser le procédé du Cru, HOLCIM Fès a introduit un système de contrôle pour la maîtrise du procédé au niveau de l'atelier du cru afin d'en améliorer en continu la régularité et la stabilité.

Dans ce travail, nous avons procédé de la façon suivante:

- Dans le premier chapitre, nous avons donné une brève présentation de la société.
- Dans le deuxième chapitre, nous avons traité les caractéristiques du ciment, les divers procédés de fabrication du ciment et les analyses effectuées.
- Dans le troisième chapitre, nous avons donné un aperçu sur le cru et ses différents constituants, et aussi nous avons développé mon sujet qui s'intitule : Effet de la granulométrie sur la qualité d'analyse du cru.
- Enfin, une conclusion.

Chapitre 1

Aperçus sur la cimenterie HOLCIM Maroc

I-Aperçus sur la cimenterie HOLCIM Maroc

I-1 : Présentation générale de la société



HOLCIM RAS EL MA

Läusine, a été mise en service en 1993, utilise le procédé de fabrication à voie sèche intégrale. Située à 25 km au sud de Fès, cette unité est construite selon les technologies les plus récentes dans le domaine de ländustrie de ciment. Cette unité a enregistré döexcellentes performances depuis son récent démarrage notamment en matière de consommation calorifique et productivité le site est doté döun système de management intégré (certification ISO 9001 et ISO 14001), en plus il a été conçue avec une possibilité de doublement de capacité si les besoins du marché le justifient, cela est prévu pour 2010 avec läinstallation du nouveau broyeur Preka.

Läusine söétend sur 230 hectares et produit actuellement trois types de ciment : le CPJ 35, 45et 55.

Le site bénéficie de plusieurs avantages, entre autres :

- La disponibilité des matières premières en quantité et en qualité.
- La possibilité döalimentation en eau et en énergie électrique.
- La qualité des terrains de point de vue fondation et écoulement de la production et läapprovisionnement de la cimenterie.

I-2: Historique de HOLCIM Maroc



Le nom HOLCIM est simple et facile à retenir : Hol rappelle les origines du Groupe (le village Holderbank), et cim symbolise l'activité du ciment. Ce changement intervient alors que le groupe HOLCIM, l'actionnaire majoritaire a décidé d'unifier, dans le cadre d'une nouvelle stratégie de communication le nom de toutes ses filiales à travers le monde.

- En 1972, la Création d'une entreprise pour la construction d'une cimenterie à Oujda.
- La Cimenterie Maghrébine (CIMA). Son capital de 75 millions de dirhams se Développement Industriel (ODI), et l'Algérie par le biais de la Société Nationale des Matériaux de Construction (SNMC).
- 1976 : La Création de La Cimenterie de l'Oriental (CIOR), Société anonyme pour poursuivre la réalisation de la cimenterie d'Oujda.
- 1979 : La mise en route de l'unité d'Oujda (deux lignes de cuisson), sa capacité de production est de 1,2 Mt / an.
- 1980 : La création d'un centre d'ensachage à Fès de 0,5 Mt an de capacité.
- 1982 : La création d'un centre d'ensachage à Casablanca de 0,35 Mt an de capacité. Réalisation d'une voie de chemin de fer pour acheminer une partie de la production d'Oujda vers Fès et Casablanca.
- Acquisition de 85 wagons-citernes pour le transport du ciment en vrac.
- 1989 : CIOR installe à Doukkarat (Fès) un centre de broyage d'une capacité de 350000 t/ an.
- 1990 : CIOR lance la réalisation d'une unité de production de clinker à Ras El Ma.
- 1993 : Mise en route de L'usine de Ras El Ma.
- 1996 : Démarrage d'une Unité de broyage / ensachage à l'usine de REM.

- 2000 : La démarche ISO 9001 et ISO 14001 a été mise en place à l'usine de FÈS REM pour garantir la maîtrise et l'amélioration continue de la quantité des produits et services ainsi que le respect de l'environnement.
- 2001 : La mise en place de dispositif de traitement de combustibles de substitution et d'un laboratoire spécifique doté d'équipement à la pointe de la technologie.
- 2002 : CIOR change de nom et d'identité visuelle et devient HOLCIM Maroc.
- Démarrage de HOLCIM Granulats.
- 2004 : Extension de la cimenterie de Fès.
- 2005 : Démarrage du centre d'ensilage et de distribution de Settât.
- 2006 : Extension du centre de Nador.
- 2007 : Démarrage de la cimenterie de Settât et de la plate forme Ecoval.
- 2008 : Lancement du projet de doublement de capacité de production de l'usine de Fès. Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 du centre de Nador.
- 2010 : L'édification du projet d'extension de l'usine Ras El Ma pour augmenter la capacité de production à environ 50%.

I-3 : Activités principales

Les activités principales de HOLCIM sont le ciment, le béton et les granulats. Le ciment est l'une des activités principales de HOLCIM (Maroc). Elle exploite trois cimenteries à (OUJDA, FES; SETTAT), un centre de broyage, d'ensilage et de distribution (Nador) et un centre d'ensilage et de distribution à (Casablanca). Les ciments produits sont certifiés NM (Norme Marocaine des ciments). HOLCIM produit 3 types de ciment: CPJ 35, CPJ 45 et CPJ 55.

I-4 : Cadre juridique

Raison sociale : HOLCIM (MAROC).

Forme juridique : société anonyme de droit privé.

Date de création : 1976 pour une durée de 99 ans.

Activité : production et commercialisation du ciment.

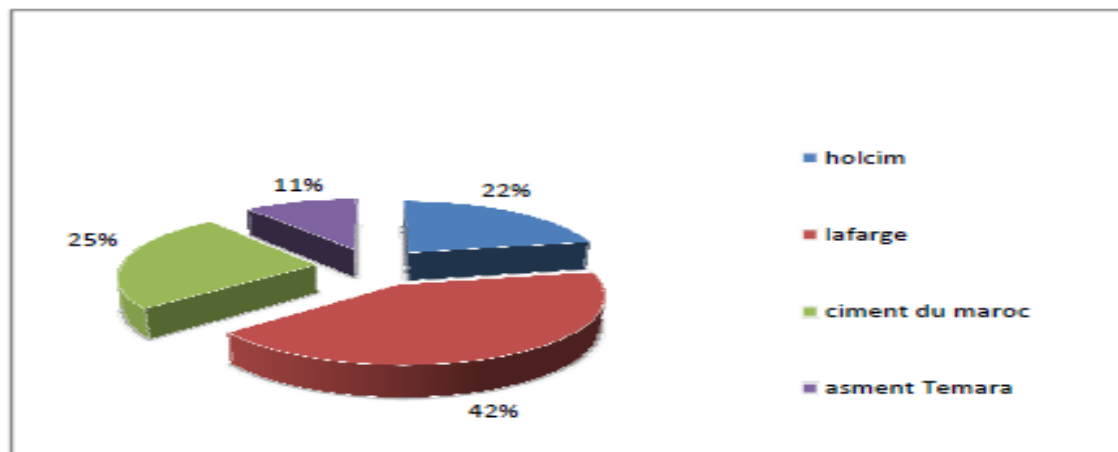
Capital social : 91.000.000 MAD.

Registre commercial : 24713.

N° de production fiscale: 512367.

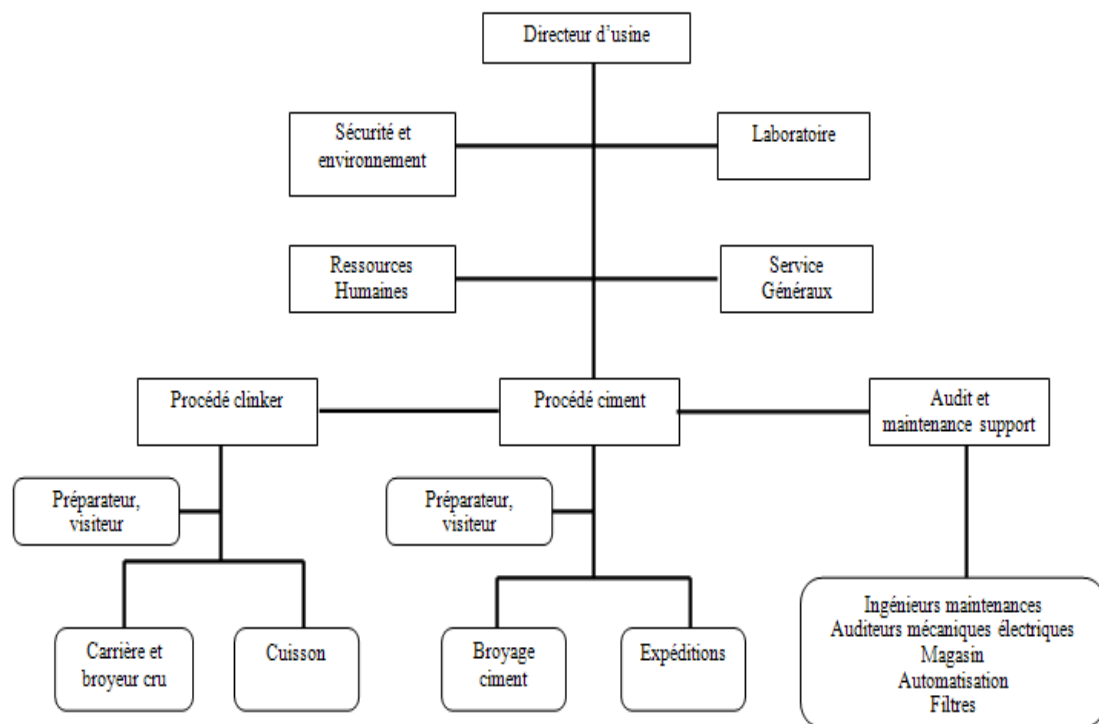
Affiliation à la CNSS : 1515123.

I-5 : Situation de la cimenterie HOLCIM dans le marché national



Situation de la cimenterie HOLCIM dans le marché national

I.6 Organigramme de HOLCIM Maroc RAS EL MA



L'organigramme de l'organisation HOLCIM RAS EL MA

Chapitre 2

Généralité sur le ciment, production et contrôle de son qualité

II-1 généralité sur le ciment

II-1.1 : Historique du ciment

Dans le foisonnement des découvertes du 18^{ème} siècle, des inventions relatives à la fabrication des liants ont été plus ou moins simultanées, aussi bien en Europe qu'en Amérique.

En 1750, l'ingénieur anglais John Smeaton, chargé de construire le phare d'Eddystone, fait de nombreux essais à partir de différents calcaires, tufs et gypses à l'eau douce et salée. Il découvre alors que pour qu'il poursuive la meilleure chaux hydraulique est obtenue à partir d'un calcaire renfermant une quantité importante de matière argileuse.

Vers 1812, le Français Louis Vicat montre que pour obtenir des chaux hydrauliques, il était nécessaire que la matière première utilisée contienne une certaine quantité d'argile. Il

donne au rapport des quantités d'argile et de chaux le nom d'indice d'hydraulicité. Tirant les conclusions de ses recherches, Louis Vicat préconise la cuisson d'un mélange en proportions convenables de chaux et d'argile. Il devient donc à la fois l'inventeur des chaux hydrauliques artificielles et le père des ciments portland artificiels.

En 1824, l'industriel anglais John Aspdin, prend le premier brevet de fabrication du ciment, produit par cuisson d'un mélange artificiel de deux composants : le calcaire et l'argile, en proportion de 3 pour 1.

Ce matériau est baptisé ciment Portland soit en raison de la localité d'où il provient, soit par analogie du ciment durci avec la pierre de Portland, ou bien par référence à l'étage géologique (le portlandien)

II-1.2 Qu'est ce qu'un ciment?

A nos jours, le ciment étant un liant hydraulique utilisé dans différents domaines, principalement comme matériel de construction. Il est fabriqué à partir de la cuisson, le mélange et le broyage de différentes matières premières.

Tout d'abord, sont mélangés du calcaire, de l'argile et des additifs tels que les minerais de fer, le schiste et la fluorine ; ce mélange appelé "cru", est broyé et porté à haute température ($\sim 1450^{\circ}\text{C}$) dans un four cylindrique. Les transformations physico-chimiques provoquent la création d'un produit appelé clinker. Par la suite l'ajout de différents éléments additifs tels que le gypse, la pouzzolane et le calcaire nous donne le ciment.

II-1.3 Matières premières

Les matières premières qui rentrent dans la fabrication du Ciment sont essentiellement le calcaire et l'argile :

Calcaire

L'usine HOLCIM n'est pas aléatoirement installée à Ras El Ma mais c'est à cause de la richesse de cette région d'une roche sédimentaire qui est le calcaire, c'est le constituant majeur du clinker et représente 80%. Il est prévu que HOLCIM peut profiter de cette carrière calcaire jusqu'à 100 ans. Plus le calcaire est blanc plus il est pur, l'élément majeur dans le calcaire est le (CaCO_3) . D'ailleurs la réaction chimique de base de la fabrication du ciment commence avec la décomposition du carbonate de calcium (CaCO_3) en chaux (oxyde de calcium, CaO) accompagnée d'un dégagement de gaz carbonique (CO_2).

Argile

L'argile est un minéral (plus exactement une famille de minéraux) de la famille des silicates. Le gisement est situé à 7 km de l'usine avec une réserve de l'ordre de 200 millions de tonnes.

L'argile est une roche sédimentaire, composée par une large part de minéraux spécifiques, Silicates en générales d'aluminium plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée qui explique leur plasticité, ou bien une structure fibreuse qui explique leurs qualités d'absorption.

Le schiste

Le schiste est une roche métamorphique d'origine sédimentaire (souvent une argile). Le gisement du schiste exploité dans une carrière située à la région de SEFROU à 45 Km de l'usine. Il intervient dans le ciment comme élément de correction par sa composition riche en silicates.

Minerai de fer

Le minerai de fer provient d'une carrière se trouvant à 17km d'AZROU. Il intervient pour compenser le manque de Fe_2O_3 .

Fluorine

La fluorine est une espèce minérale composée de fluorure de calcium, de formule idéale CaF_2 avec des traces : Y, Ce, Si, Al, Fe, Mg, Eu, O, Cl, et des traces de composés organiques. Ces différents ions expliquent les multiples couleurs et zonations colorées rencontrées pour ce minéral. Le gisement de la fluorine se situe dans la région du MIDELT.

Les matières utilisées comme ajouts

Ce sont le gypse, pouzzolane et calcaire :

Le gypse

Le gypse est un minéral composé de sulfate hydraté de calcium de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ainsi qu'une roche évaporitique. Le gisement du gypse se situe dans la région d'Alger.

La pouzzolane

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ce sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence d'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes.

Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers. Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et la durabilité, à la réduction des réactions alcalins agrégats et du retrait au séchage. Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans le ciment.

II-2 Production

I-2.1 Procédé de fabrication du ciment

La fabrication du ciment est un processus très complexe dans lequel la matière première subit des transformations physico-chimiques successives jusqu'à l'obtention du produit fini. Ce procédé comprend deux phases essentielles :

La première phase du procédé comprend la fabrication du clinker suite à la cuisson d'un mélange cru (ou farine). Cette farine est composée en grande proportion de calcaire 82% 13% de schiste, 4% de sable et 1% de minerais de fer. Le clinker constitue en quelque sorte le ciment dans son état pur.

La deuxième phase est le broyage du clinker mélangé à des matières de corrections (ajouts) constitués, dans le cas de l'unité de Ras El Ma de gypse, calcaire, pouzzolane, Suivant les qualités du ciment souhaité le clinker est plus ou moins dilué.

L'Usine HOLCIM Ras El Ma produit trois types du ciment :(CPJ35, CPJ45, CPJ55).

II-2.2 Les différentes voies de production du ciment

Il existe 4 principaux procédés de fabrication du ciment qui diffèrent entre eux par la nature du traitement thermique utilisé.

- **La voie humide:** La matière première, après son concassage est délavée dans l'eau, puis broyée en humide. La pâte obtenue est homogénéisée, puis alimente le four. Cette méthode est abandonnée pour des raisons d'économie d'énergie.

- **La voie semi humide:** la matière est préparée en voie humide, puis séché avant le four.
- **La voie semi sèche:** la farine crue, sèche, passe d'abord dans un gradateur ou elle est humidifiée.
- **La voie sèche:** c'est la plus économique. La matière première, une fois une fois concassée est broyée à sec, homogénéisée, et avant l'entrée au four, elle se chauffe à travers des cyclones. A l'entrée du four rotatif, la farine est sous une température de 900°C à 1000 °C. autrement dit, cette voie est plus rentable et plus optimale au niveau énergétique.

Le procédé de fabrication du ciment utilisé à l'usine de Ras El Ma est voie sèche.

II-2.3 Les étapes principales de fabrication du ciment

Le procédé de fabrication du ciment utilisé à l'usine de Ras El MA est la voie sèche. Elle est répartie en 14 étapes de production :

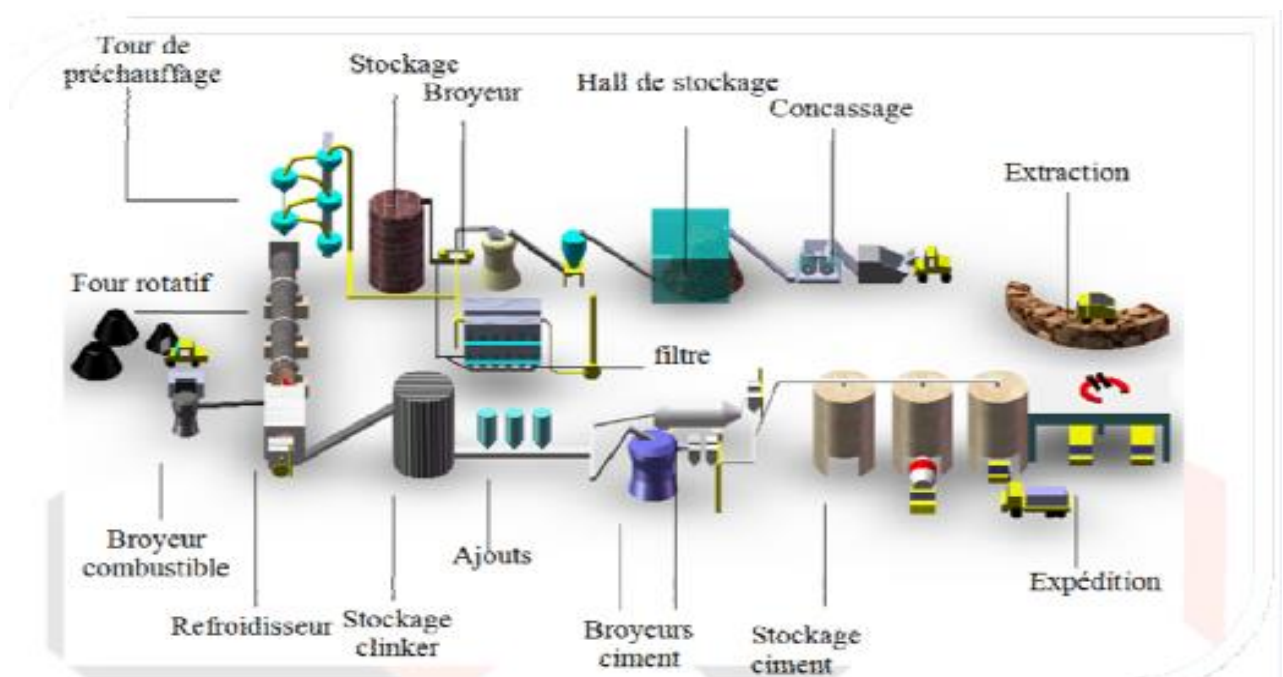
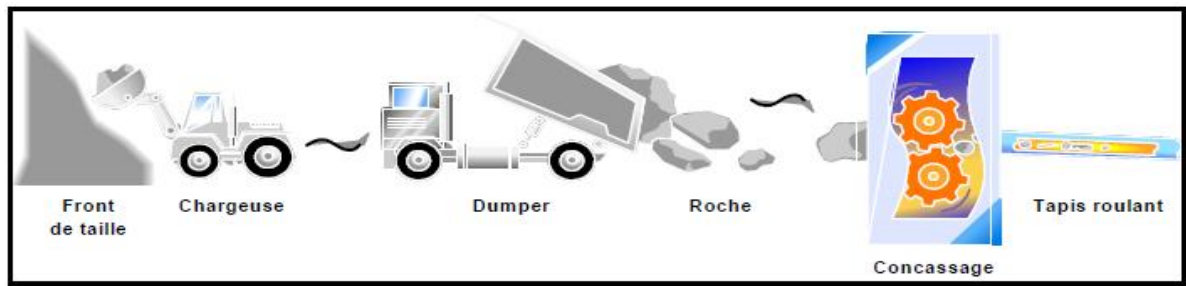


Figure : Vue générale du site

Carrière

La carrière en cimenterie constitue la source en matières premières lesquelles subiront des transformations pour fabriquer le produit fini. Les matières premières doivent contenir certains éléments chimiques (carbonate de calcium, oxyde de fer, alumine et silice) et sont généralement des calcaires et des argiles. Elles sont extraites au niveau de la carrière sous

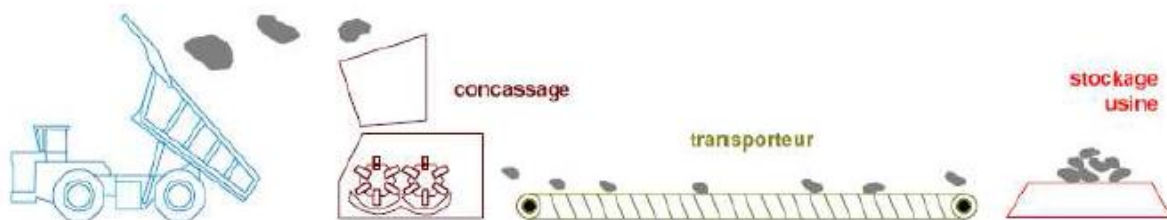
forme de blocs de dimensions très variées ($\sim 1 \text{ m}^3$). Ces matières premières après extraction sont acheminées par des dumpers au concasseur.



Schémas illustrant l'extraction

Concassage

En vue d'optimiser et faciliter le stockage et la manutention des matières premières, les blocs extraits au niveau de la carrière sont introduits dans un concasseur pour réduire leur dimensions ($\sim 5 \text{ à } 10 \text{ cm}$). Pour réduire la taille des blocs, le concassage consiste à soumettre les matières premières à des efforts d'impact, de cisaillement ou de compression. Le type du concasseur est choisi en fonction du procédé de concassage adopté par la cimenterie.



Schémas illustrant le concassage

Le dépoussiérage

Le dépoussiérage de l'atelier de concassage est assuré par un filtre à manches qui permet la récupération des matières très fines pour les remettre dans un circuit. Ceci permet à la fois un gain en productivité et une réduction des nuisances engendrées par les poussières aussi bien pour l'installation que pour le personnel.



Cellule de dépoussiérage

Pré-homogénéisation

Après le concassage de la matière première, on mélange de façon aussi homogène que possible les composants.

La préhomogénéisation des matières premières est une opération qui consiste à assurer une composition chimique régulière du mélange des matières premières.

Des échantillons du mélange des matières premières sont prélevés lors de la constitution des tas dans une station d'échantillonnage, ces échantillons sont analysés et corrigés par le PGNA (analyse instantanée par activation neutronique), ce mélange est dénommé le cru. La correction se fait dans cette étape par des ajouts tels que le schiste, le calcaire, le minerai de fer et le sable, et on ajoute aussi la fluorine qui peut être importée ou locale, son rôle essentiel va apparaître pendant l'étape de cuisson, ce dernier permet la diminution du coût de clinker en gardant la même qualité.

Broyeur cru

Les matières préparées par le procédé du concassage et la pré-homogénéisation doivent être maintenues réduites à la finesse requise pour la cuisson.

Le broyage et le séchage des matières premières se fait dans un broyeur vertical à deux paires de galets avec un séparateur incorporé. Le séchage de la matière est assuré par les gaz chauds en provenance de la tour de préchauffage et du refroidisseur en cas de besoin. Une quantité d'eau voisine de 4 m³/h peut être injectée dans le broyeur pour mieux étaler et stabiliser le lit de matière et assurer un bon fonctionnement du broyeur.

La matière fine à la sortie du séparateur est récupérée sous forme de farine dans les cyclones et dans le filtre cru.

Homogénéisation

L'atelier de l'homogénéisation a pour rôle d'assurer un stock tampon de farine entre le four et l'atelier cru, ainsi que rendre le plus stable possible la composition chimique et granulométrique de la farine à l'alimentation du four pour que la cuisson soit régulière. Le cru est homogénéisé et ensuite stocké dans le silo d'Homogénéisation d'une capacité 4500 tonnes.

Préchauffage

Afin de récupérer la chaleur de gaz sortant du four, la matière dans cinq cyclones montés en série grâce à un élévateur. Un ventilateur à la base propulse les gaz chauds et les fait tourner dans chaque cyclone assurant ainsi un bon échange thermique.

Ces cyclones servent à déshydrater, chauffer, décarbonater partiellement la matière et aussi ils récupèrent la poussière contenue dans le gaz. On considère que 95% est ainsi retenue, les 5% restant se dirigent vers un filtre.



La tour (préchauffeurs)

La cuisson de la farine chaude dans le four

Les systèmes des fours sont conçus en cimenterie pour répondre aux exigences chimiques du procédé durant lequel la matière crue est transformée en clinker. Le four rotatif est un cylindre en acier d'une longueur de 64m et d'un diamètre de 4m incliné d'une pente de 3,5 % reposant sur des stations de roulement, il est garni intérieurement par des produits réfractaires. Durant la cuisson, le four rotatif est animé d'un mouvement de rotation, la disposition en pente du four permet le mouvement de la matière première qui est injectée de l'autre extrémité par rapport à la flamme de chauffe. Durant ce déplacement, la matière se transforme par cuisson tout en avançant de son état initial jusqu'à ce qu'elle devienne « Clinkérisée » à une température normalement de 1450°C. Mais maintenant après l'utilisation de la fluorine cette température a diminué jusqu'aux environs de 1200°C. A noter que la fluorine n'a pas seulement cet intérêt économique mais elle améliore aussi la réactivité du clinker dans le ciment.



Four de cuisson

Refroidissement

Quand le clinker sort du four, il passe au refroidissement à l'aide de cinq ventilateurs qui propulsent de l'air, ce mode de refroidissement est appelé Trempe : c'est un refroidissement rapide pour obtenir un clinker réactif, utilisé afin d'avoir la granulométrie désirée. Le clinker prêt à l'emploi est transféré à un silo de stockage.

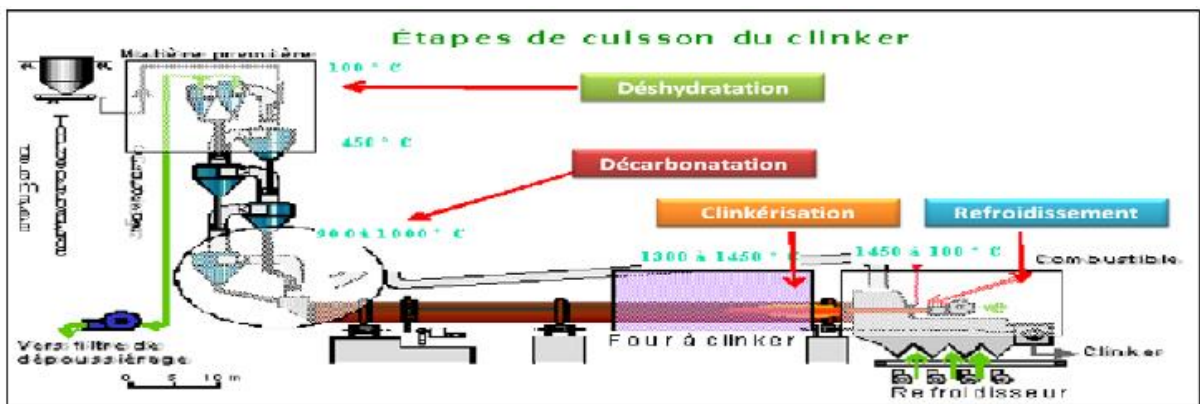


Schéma illustrant le système de préchauffage, cuisson et refroidissement

Les ajouts

Jusqu'à maintenant nous n'avons que du clinker qui est l'élément principal du ciment. Selon la qualité du ciment souhaitée et en conformité avec les normes marocaines en

peut ajouter dans des proportions bien définies des matières d'addition telles que le gypse qui est un régulateur de prise, le calcaire et la pouzzolane.

Broyage du ciment

L'atelier du broyage ciment est alimenté en clinker, gypse et calcaire à partir de silos de stockage de ces matières, par un ensemble de doseurs et transporteurs à bande. Le clinker et les ajouts, qui sont des matériaux grossiers par rapport à la granulométrie du ciment, sont introduits au niveau du broyeur soit dans des proportions prédéfinies pour subir des efforts mécaniques du broyage et produire ainsi le ciment qui est d'une finesse inférieure à 40 microns.

L'usine de RAS EL MA utilise deux broyeurs qui fonctionnent simultanément, un broyeur horizontal à boulets de débit 25 t/h équipé d'un séparateur dynamique, et dans un broyeur vertical à galets de débit 115t/h.



Broyeur à boulets



broyeur à galets

Stockage et expédition

Les expéditions comprennent le stockage du ciment, son conditionnement (ensachage). En cas de livraison par sacs et son chargement sur l'outil de transport (camion, train).

Acheminés vers les silos de stockage par transport pneumatique ou mécanique, les ciments quittent l'usine en sacs (92.81% de l'expédition) ou en vrac (7.19% de l'expédition). Les sacs contiennent généralement 50 kg de ciment et l'ensachage atteint fréquemment 100 tonnes par heure. Les sacs sont acheminés vers des palettiseurs qui constituent des palettes de 1500 kg transportées par camion. Le ciment livré en vrac est transporté par camion-citerne.



Schémas illustrant le stockage et expédition du ciment

II- II-3 Contrôle de qualité des produits cimentiers

Introduction :

Dans une société cimentière, le four est le corps de l'usine, tandis que le laboratoire est le cerveau de l'usine, c'est pour cela que la mission du laboratoire au sein de HOLCIM est très importante.

Le laboratoire a pour but de contrôler la qualité des échantillons prélevés de façon régulière tout au long du procédé de la fabrication depuis les matières premières jusqu'au produit fini. Afin de connaître leur teneur en différents composés et de pouvoir ainsi les doser.

Les différents contrôles effectués sont :

- Un contrôle des matières premières chaque semaine.
- Un contrôle de sortie broyeur à cru chaque heure.
- Un contrôle de la farine chaude 3 fois par jour.
- Un contrôle de clinker chaque heure.
- Un contrôle de ciment chaque 2 heures.

Les résultats de ces contrôles sont utilisés pour la correction des consignes des doseurs et que rectifie automatiquement la salle de contrôle.

Le ciment répond à des normes marocaines très sévères sur lesquelles les cimenteries s'engagent.

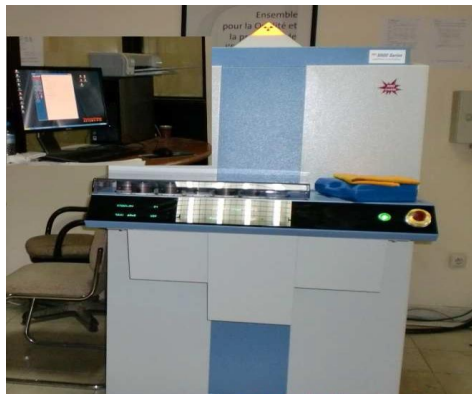
Dans le laboratoire de HOLCIM Ras El Ma on trouve différentes procédures chimiques et physiques nécessaires pour effectuer ces contrôles.

II-3.1 Les essais chimiques :

a-Analyse par spectromètre de fluorescence à rayon X

La spectrométrie de fluorescence X (FX ou XRF pour X-ray fluorescence) est une technique d'analyse élémentaire qui permet de :

Qualifier les éléments chimiques présents dans un échantillon. Après cette étape nous connaissons les éléments constituant l'échantillon (ex. : Carbone, Fer, Chrome, Nickel, etc.).
Quantifier les éléments présents (ex. : Carbone 0.02%, Fer 72,98 %, Chrome 18 % et Nickel 9%).



Spectroscopie à fluorescence X

b-La perte au feu (P.A.F)

Cette expérience nous permet de déterminer la teneur en CO_2 et H_2O présent dans la farine traitée, qui a été évacuée pendant un traitement thermique. Cette analyse est réalisée dans un four à moufle à 1000°C pour une durée minimale de 20 min.



Four à moufle

On calcule la perte au feu à l'aide de la formule suivante

$$\text{P.A.F (\%)} = \frac{(m1+m2-m3)}{m2} \times 100$$

Avec:

m1 : la masse du creuset en platine vide.

m2 : la masse de l'échantillon mesurée.

m3 : la masse finale de l'échantillon + la masse de creuset.

II-3.2 Les essais physiques

a- La prise

Cet essai a pour but de déterminer le temps de prise pour un ciment, c'est-à-dire la durée qui s'écoule entre l'instant où le liant (ciment) est mis en contact avec l'eau de gâchage et le début de prise. Cet essai se fait à l'aide de l'aiguille de Vicat. En enfonçant cette aiguille dans un moule tronconique rempli de pâte pure, on mesure ce temps et on le compare aux temps standards.



L'aiguille de Vicat

b- Essais de flexion et de compression

Essai de rupture par flexion

Il permet de déterminer la contrainte de traction par flexion. La rupture est effectuée sous charge concentrée dans une machine munie d'un dispositif comportant 3 appuis.

Essai de rupture par compression

La rupture est effectuée à l'aide d'un appareil appelé presse, muni d'un dispositif qui casse les moules en détectant la force qu'ils ont supportés en Méga Pascal (MPa). Pour les deux cas il faut d'abord préparer des moules de béton. Ces moules vont subir des périodes différentes (2 jours, 7 jrs et 28 jrs) dans une humidité constante de 95%



Presse de flexion et compression



moule de béton

Remarque :

La classification du ciment est basée sur ce paramètre.

- CPJ 35 à une résistance moyenne d'environ 35 MPa en cas de 28j
- CPJ 45 à une résistance moyenne d'environ 45 MPa en cas de 28j
- CPJ 55 à une résistance moyenne d'environ 55 MPa en cas de 28j

c- La finesse

Son objectif est de déterminer la granulométrie des échantillons. À l'aide d'un courant d'air, on crée une différence de pression entre les deux niveaux du tamis. Les passants à travers le tamis sont entraînés par le courant d'air et les grains dont les dimensions sont supérieures aux mailles du tamis constituent donc les refus.



Tamiseur à courant d'air

Expression du résultat :

$$\text{Taux de refus (\%)} = \frac{m_2}{m_1} \times 100$$

Avec :

- m_1 : poids pèse avant tamisage.
- m_2 : poids pèse après tamisage.

L'analyse de finesse nous aide à contrôler l'homogénéisation de l'échantillon et de contrôler aussi le bon fonctionnement des broyeurs et des séparateurs.

Les analyses effectuées sur les produits finis et semi-fini, sont réalisés dans l'objectif d'effectuer les corrections nécessaires pour l'amélioration des performances de ces produits et pour répondre aux exigences des clients

Chapitre 3

EFFET DE LA GRANULOMETRIE (BROYAGE) SUR LA QUALITE D'ANALYSE

Problématique de sujet

L'analyse par spectromètre consiste à analyser une surface d'ordre Angstrom des pastilles, le spectromètre est lié à un ordinateur qui affiche les analyses des échantillons grâce au logiciel OXSAS qui donne des compositions en % et programmé pour donner la somme des compositions à 99,50%. Donc dans ce sujet on essaye de définir l'impact de l'effet inter éléments du crû, aussi que celui du temps de broyage sur ces analyses.

III-Effet de la granulométrie sur la qualité d'analyse

III-1 Le Cru et ses Proportions en matières premières

III-1.1 Le cru

Un mélange homogène de calcaire de schiste de sable et de minerais de fer est réalisé. Les proportions sont déterminées selon leurs compositions chimiques et sont toujours proches de 82% de calcaire, 13% de schiste, 4% de sable et 1% de minerais de fer. Le mélange est broyé en une poudre de granulométrie inférieure à 200µm.

La poudre obtenue est homogénéisée par un mélangeur mécanique. Le produit obtenu est appelé crû.

III-1.2 Proportions des matières premières dans le crû

Pour avoir une bonne composition chimique du crû dépendant de la composition chimique de chaque matière première et pour limiter les quantités des impuretés on fait une optimisation de la composition chimique à l'aide de 3 équations.

a-LSF : Lime Saturation Factor (Facteur de saturation en chaux)

$$LSF = \frac{CaO \times 100\%}{2,8 SiO_2 + 1,18 Al_2O_3 + 0,65 Fe_2O_3}$$

Si FSC > 100 : Il y a trop de chaux et l'excès se trouve sous forme de «chaux libre» qui est trop dangereuse pour le ciment, car elle ne se combine pas et conduit au gonflement du ciment. Le maximum de chaux libre acceptable est de 1,5%.

Si $FSC < 100$: il n'y a pas assez de chaux pour se combiner avec la silice, l'alumine et l'oxyde de Fer, qui vont rester libre dans le clinker et par conséquent diminuer sa résistance.

b-Module Silicique (MS)

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} = \frac{S}{A + F} = 1,9 \text{ à } 3,2$$

Fe_2O_3 et Al_2O_3 sont des agents de fusion, grâce auxquels la formation de la phase liquide commence. S'il y en a peu, le MS est élevée et la cuisson est difficile.

- $MS > 2,5$ Cuisson difficile
- $MS < 2,45$ Cuisson facile

c-Module Alumino-Ferrique (MAF)

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} = \frac{A}{F} = 1,5 \text{ à } 2,5$$

Sa valeur caractérise la nature de la phase fondue, contenant la presque totalité des deux oxydes Al_2O_3 et Fe_2O_3 . Quand MAF augmente, la viscosité de la phase fluide augmente aussi, par conséquent, une difficulté à la cuisson d'où une grande consommation d'énergie.

III-2 Impact de l'effet inter éléments

III-2.1 Analyses du crû selon trois méthodes

Pour connaître l'effet de la granulométrie (broyage) sur la qualité d'analyses on prend le crû et on l'analyse selon plusieurs méthodes.

- 1^{er} méthode : c'est la méthode normale suivie par les chimistes du laboratoire.

On prend 20g de cru et on l'introduit dans un bol en carbure de tungstène et on met deux gouttes de Triéthanolamine pour éviter le colmatage de la matière dans le bol et faciliter le compactage de la pastille. Ensuite, l'assiette est introduite dans un sur broyeur pendant 3min pour obtenir des particules très fines.

Enfin on récupère le cru broyé on le met dans la presse à pastilles et on analyse la pastille produite.

- 2^{eme} méthode :

On prend 20g de cru et on la met au tamiseur à courant d'air et on récupère les passants qui ont un diamètre inférieur à 90µm, et on met le cru broyé dans la presse à pastilles et on analyse par la suite la pastille produite.

- 3^{eme} méthode :

On prend 20g de cru et on la met au tamiseur à courant d'air et on récupère les refus qui ont un diamètre supérieur à 90µm, et on les met dans la presse à pastilles et on analyse par la suite la pastille produite.

Les résultats obtenus sont dans les tableaux ci-dessous. Ces analyses sont faites du 13 au 20 avril.

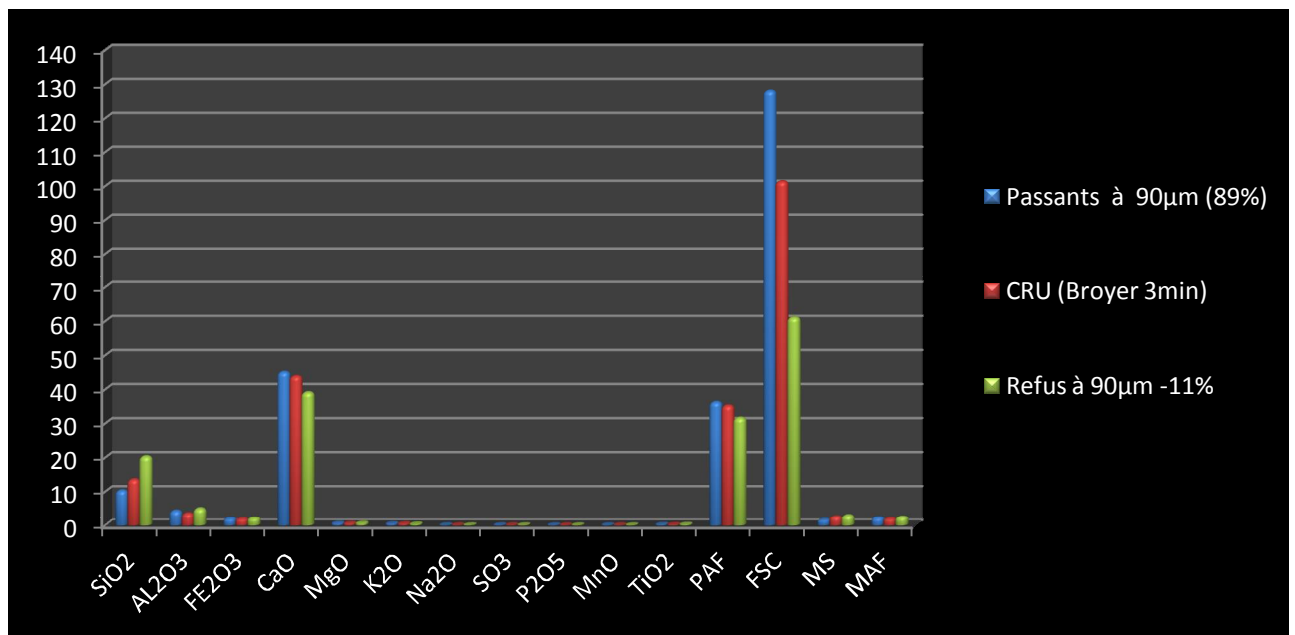
III-2.2 résultats

Tableau 1 : Résultats d'analyse du cru selon trois méthodes

	13/05/2015			14/05/2015		
.	Passants à 90µm (89%)	CRU (Broyer 3min)	Refus à 90µm (11%)	Passants à 90µm (87%)	CRU (Broyer 3min)	Refus à 90µm (13%)
SiO ₂	10.30	13.55	20.29	9.97	13.63	20.99
Al ₂ O ₃	4.31	3.48	4.96	4.18	3.44	4.72
Fe ₂ O ₃	1.96	1.85	2.07	1.98	1.86	1.99
CaO	45.07	43.83	39.07	45.34	43.83	38.86
MgO	0.7	0.65	0.75	0.69	0.64	0.75
K ₂ O	0.55	0.56	0.43	0.55	0.56	0.41
Na ₂ O	-0.01	0.04	-0.08	-0.01	0.03	-0.06
SO ₃	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.08
P ₂ O ₅	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02
MnO	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
TiO ₂	0.25	0.2	0.31	0.24	0.2	0.3
PAF	36.24	35.21	31.58	36.44	35.2	31.41
FSC	128.02	101.31	61.04	132.84	100.95	59.21
MS	1.64	2.54	2.89	1.62	2.57	3.13
MAF	2.19	1.88	2.40	2.10-	1.85	2.37

	15/05/2015			16/05/2015		
.	Passants à 90µm (89%)	CRU (Broyer 3min)	Refus à 90µm (11%)	Passants à 90µm (90%)	CRU (Broyer 3min)	Refus à 90µm (10%)
SiO ₂	9.89	13.42	16.06	9.86	13.43	15.64
Al ₂ O ₃	4.22	3.45	4.60	4.18	3.36	4.23
Fe ₂ O ₃	1.92	1.75	1.81	1.96	1.77	1.75
CaO	45.39	44	43.83	45.42	44.06	42.63
MgO	0.7	0.64	0.73	0.7	0.63	0.69
K ₂ O	0.56	0.56	0.4	0.55	0.55	0.37
Na ₂ O	-0.02	0.03	-0.04	-0.04	0.02	-0.01
SO ₃	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07
P ₂ O ₅	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02
MnO	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
TiO ₂	0.24	0.19	0.29	0.24	0.19	0.26
PAF	36.42	35.33	33.72	36.51	35.36	34.10
FSC	133.85	102.86	81.10	134.3	103.14	84.87
MS	1.61	2.58	2.51	1.61	2.62	2.61
MAF	2.20	1.97	2.54	2.13	1.89	2.42

Le graphe si dessous montre les différences entres les résultats de chaque méthodes



Résultats d'analyse du cru (13/05/2015)

III-2.3 Interprétation des résultats obtenus

Alors on constate d'après ces résultats que le SiO_2 varie inversement proportionnellement avec la chaux CaO .

Prenons le cas des refus le SiO_2 est de 20,29 qui est très grande par rapport aux normes qui sont entre 13 et 15 donc pour des résultats en pourcentage ceci est expliqué par la présence de la silice avec des grandes dimensions ce qui a influencé sur l'analyse et donc elle est inacceptable.

En ce qui concerne les passants, le SiO_2 est de 10,30 qui est inférieur aux normes et dans notre cas on remarque avec cet abaissement de SiO_2 une augmentation de la composition de la chaux ce qui influence aussi sur l'analyse.

Alors la présence de tous les composants en proportions optimales est réalisée par le broyage qui rassemble les refus et les passants pour les donner avec une granulométrie ultime, et par conséquent une bonne analyse.

III-3 Temps de broyage (3min)

Après avoir connaître l'impact de la granulométrie sur les analyses, le temps de broyage présente aussi un grand point d'interrogation, pourquoi 3min ?

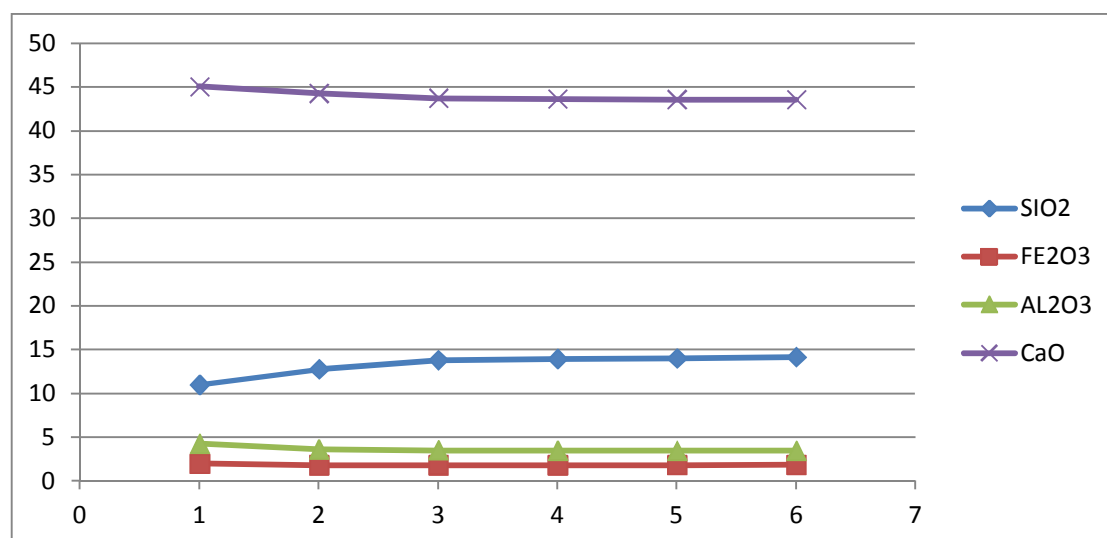
Pour ce on fait des analyses sur le cru broyé dans le même broyeur mais avec d'autres durées de broyage (sans broyage, 1min, 2min, 3min, 4min et 6min)

III-3.1 Résultats

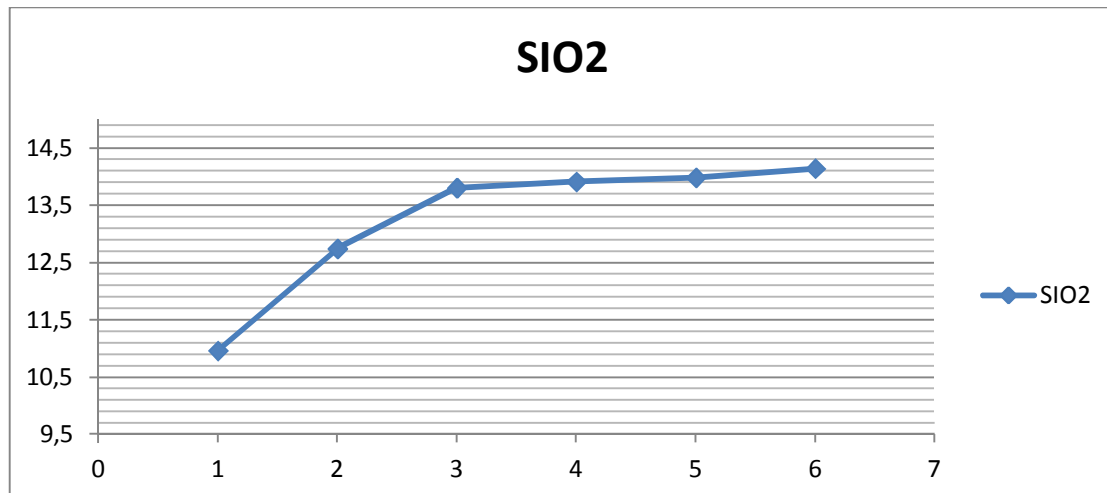
TABLEAU 2 : Résultats d'analyses pour différents temps de broyage

	0min Sans broyage	1min	2min	3min	4min	6min
SiO ₂	10,96	12,74	13,8	13,91	13,98	14,14
Fe ₂ O ₃	1,95	1,78	1,80	1,79	1,82	1,83
Al ₂ O ₃	4,24	3,60	3,50	3,46	3,45	3,44
CaO	45,01	44,25	43,72	43,63	43,57	43,54

Résultats d'analyses sous forme graphique



Courbes des principaux composants du cru broyé pendant différentes durées



Analyses de SiO₂ dans le cru broyé pendant différentes durées

III-3.3 Interprétation des résultats obtenus

Puisque la silice est le composant le plus volumineux, donc il présente la partie référentielle dans le broyage.

On constate à l'aide du graphe au dessus que après 3min de broyage la composition de la silice reste presque constante, donc « 3min » de broyage est optimal.

CONCLUSION :

Avec un broyage de 3min on peut y avoir des pastilles qui donne chance à tout les composant du crû pour qu'ils êtres tous bien analyser, et en *évitant* de *gaspiller* l'énergie et par conséquence avoir une bonne qualité des analyses.

Les analyses qu'on a effectuée nous ont permis non seulement de contrôler chimiquement le cru et ses propres composants, mais aussi de vivre une expérience sur le plan professionnel, enrichissant ainsi mes connaissances théoriques et pratiques d'une part, et de prendre part aux difficultés rencontrées dans le milieu professionnel