



Licence Es-Sciences et Techniques (LST)

TECHNIQUES D'ANALYSE ET CONTROLE DE QUALITE (TACQ)

PROJET DE FIN D'ETUDES

Etude de comportement du ciment dans le béton

Présenté par :

◆ **Makroum Ismail**

Encadré par :

◆ **Mr. AYADI ABDELAZIZ** (Société)

◆ **Pr. BOUKIR Abdellatif** (FST – Fès)

Soutenu Le 08 Juin 2016 devant le jury composé de:

- **Pr. BOUKIR Abdellatif**
- **Pr. CHAKROUNE Said**
- **Pr. ALILOU El Houssine**

Stage effectué à Holcim Fès Ras El Ma

Année Universitaire 2015 / 2016

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES FES

☒ B.P. 2202 – Route d'Imouzzer – FES

☒ Ligne Directe : 212 (0)5 35 61 16 86 – Standard : 212 (0)5 35 60 82 14

Site web : <http://www.fst-usmba.ac.ma>

Sommaire

INTRODUCTION.....	1
Partie 1 : Présentation générale.....	2
I. Présentation de la société Holcim	3
1. Présentation générale :	3
2. Cimenterie Fès-Ras El Ma :	6
II. Procédé de fabrication du ciment	8
1. Différentes voies de fabrication du ciment	8
2. Procédé de fabrication par voie sèche (cas de HOLCIM Ras El Ma) Matières premières utilisées (Calcaire, Argile, Schiste, Minerai de Fer, Fluorine, Gypse)	9
III. Les différentes étapes de fabrication du ciment.....	10
1. Extraction	10
2. Concassage.....	10
3. Pré homogénéisation	11
4. Broyage du cru	11
5. Homogénéisation	13
6. Préchauffage et Cuisson	13
7. Refroidissement.....	14
8. Broyage du ciment	15
9. Stockage et expédition	15
Partie 2 : Partie expérimentale Le comportement du ciment dans le béton	17
I. Définition du ciment	18
II. Contrôle qualité du ciment	19
1. Essais chimiques.....	19
2. Essais physiques et mécaniques	22
III. Définition du Béton.....	23
1. Classification des bétons	23
2. Constituants du béton.....	24
IV. Comportement du ciment dans le béton.....	25
1. Définition	26
2. Mode opératoire de l'utilisation du cône d'HOLCIM :	26
3. Caractéristiques du sable normalisé.....	28
4. Problématique	28
5. Effectué	29
6. Interprétations des résultats.....	31
7. Solution proposée	32
Conclusion :	33

INTRODUCTION

La demande clientèle exige de plus en plus de la qualité, et pour répondre à cette exigence, les entreprises font tout leur possible pour avoir un produit d'une performance élevée, surtout dans un secteur concurrentiel que celui du ciment. La réduction du prix de revient et l'amélioration de la productivité représentent le souci majeur des cimenteries.

Le laboratoire de contrôle de qualité joue un rôle majeur dans l'industrie cimentière, car il assure la conformité du produit aux exigences des normes, d'où la nécessité de contrôles rigoureux et continus à chaque point du procédé de fabrication du ciment.

Mon stage effectuée à Holcim (Maroc) cimenterie de Fès- était une période précieuse pour comprendre le procédé de fabrication du ciment et essayer de saisir de plus près des sujets techniques dans le cadre de ma formation à la chimie industrielle.

Vu l'importance du Clinker qui est considéré comme la matière principale pour la fabrication du ciment pour le béton. L'intitulé de mon sujet de stage est « *l'Etude du comportement du ciment dans le béton* », ainsi que les matières ajoutées. Mon travail a été consacré à consacrer sur la méthode de cône HOLCIM, qui va nous aider à savoir le comportement du ciment dans le béton, et avoir une idée sur quelques paramètres qui caractérisent le béton (mesure du slump).

Le manuscrit est subdivisé en deux parties, dont :

La première est réservée à la présentation de la société, ainsi à un aperçu bibliographique sur le ciment, et le procédé de sa formation.

La seconde est expérimentale et a été consacré à l'étude des différents contrôles physico-chimiques utilisés au sein du laboratoire et plus précisément la technique de la Cône Holcim utilisé pour étudier la dispersion du béton à différentes qualités du ciment (effet du slump).

Et enfin, la mémoire se termine par une conclusion.

Partie 1 :

Présentation générale

I. Présentation de la société Holcim

1. Présentation générale :

Le nom d'Holcim est simple et facile à retenir ;

HOL : rappelle les origines du groupe, le village Holderbank.

CIM : désigne l'activité du ciment.

Fondée en 1912, Holcim est un groupe suisse leader dans les produits des matériaux de construction pour un usage varié.

Présent dans plus de 70 pays à travers le monde, le groupe est actif dans les secteurs du ciment, des granulats, tels que sable et gravier, ainsi que du béton. Il compte plus de 90000 employés à travers le monde.



Figure 1 : Implantation de HOLCIM dans le monde

a. Présentation de Holcim-Maroc

Participant à la construction de la cimenterie d'Oujda en 1978, Le groupe Holcim détient depuis 1993, 51% du capital de Holcim Maroc, la banque islamique pour le développement, est le second actionnaire avec près de 13.8%, le reste, soit 35,2%, constitue le flottant en bourse.

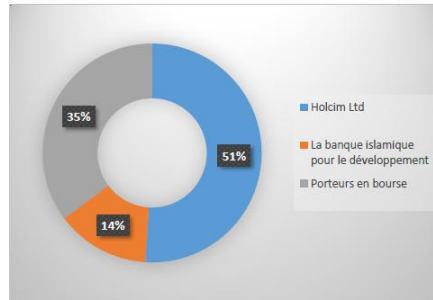


Figure 2 : Répartition du capital de Holcim Maroc

Aujourd'hui HOLLCIM est présente dans différentes régions du Maroc, et dispose d'une capacité annuelle de production de 4,5 millions de tonnes, elle exploite trois cimenteries à Oujda, Fès et Settat, un centre de broyage, d'ensachage et de distribution à Nador, ainsi qu'un centre de distribution à Casablanca.

b. Historique

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 qualité des produits et services ainsi que le respect de l'environnement.

2001 : La mise en place de dispositif de traitement des 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'ensachage et de distribution de Settat.

2006 : Extension du centre de Nador.

2007 : Démarrage de la cimenterie de Settat et de la plateforme Ecoval.

2012 : Démarrage du projet de doublement de la capacité de production clinker de la cimenterie de Fès.

c. Activités principales

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

d. Statut Juridique

🏠 Informations sur la société	
Raison sociale	HOLCIM (Maroc)
Siège social	Avenue Annakhil Hay Riad BP: 2298 - Rabat
Secteur d'activité	Bâtiment et Matériaux de Construction
Date de constitution	01/01/1976
Date d'introduction	21/12/1993

🏠 Informations financières	
Exercice	2012
Capital actuel	421 000 000,00 DH
Chiffre d'Affaires	2 003 049 257,35 DH
Nombre d'actions	4 210 000
Résultat Net	422 276 146,34 DH
Valeur nominale	100
Date d'AGO	24/04/2013

🏠 Principaux actionnaires au 25/05/2012	
HOLCIBEL SA	51,00 %
DIVERS ACTIONNAIRES	35,22 %
BANQUE ISLAMIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT	13,78 %
TOTAL	100,00 %

Figure 3 : Statut Juridique du Holcim Maroc

e. Situation géographique des sites de production

HOLCIM (Maroc), groupe cimentier national présent dans différentes régions du Maroc depuis 1978. La figure 4 présente la répartition des usines HOLCIM à l'échelle nationale.

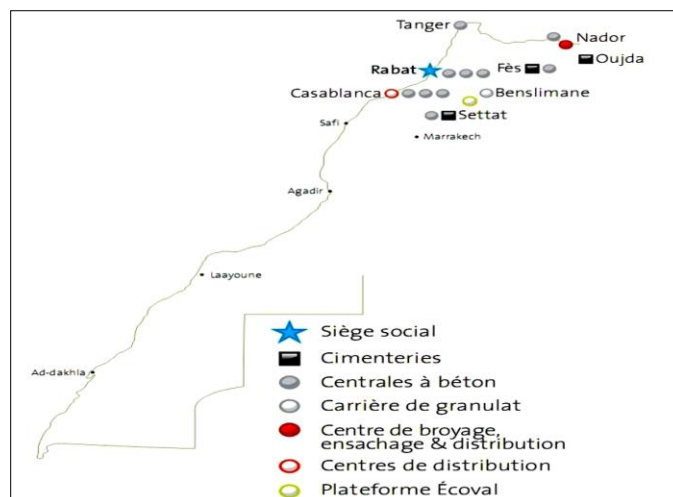


Figure 4 : Répartition du groupe Holcim sur différentes régions du royaume

2. Cimenterie Fès-Ras El Ma :

a. Présentation :

Située à 25 Km au sud de Fès, l'usine de Ras El Ma, utilise le procédé de fabrication à voie sèche intégrale, avec une capacité annuelle de plus d'un million de tonnes par an, elle comporte des zones de : concassage, broyage, stockage de la farine, cuisson, stockage du clinker, broyage des combustibles, broyage du ciment, ensachage et expédition du ciment.



Figure 5 : Cimenterie de Fès-Ras El Ma

b. Choix de site

Le site n'était pas choisi au hasard mais en tenant compte de plusieurs raisons ;

- La disponibilité de la matière première en quantité et en qualité (l'usine a été implantée à proximité d'une réserve d'exploitation estimée à 100 ans) ;
- La possibilité d'alimentation en eau (deux forages ont été réalisés à côté de l'usine) ;
- La possibilité d'alimentation en énergie ;
- La qualité des terrains de point de vue fondation et écoulement de la production et l'approvisionnement de la cimenterie.

c. Organigramme interne de la société Holcim Fès-Ras El Ma

L'organigramme de la société Holcim Fès-ElMa se présente de la forme suivante :

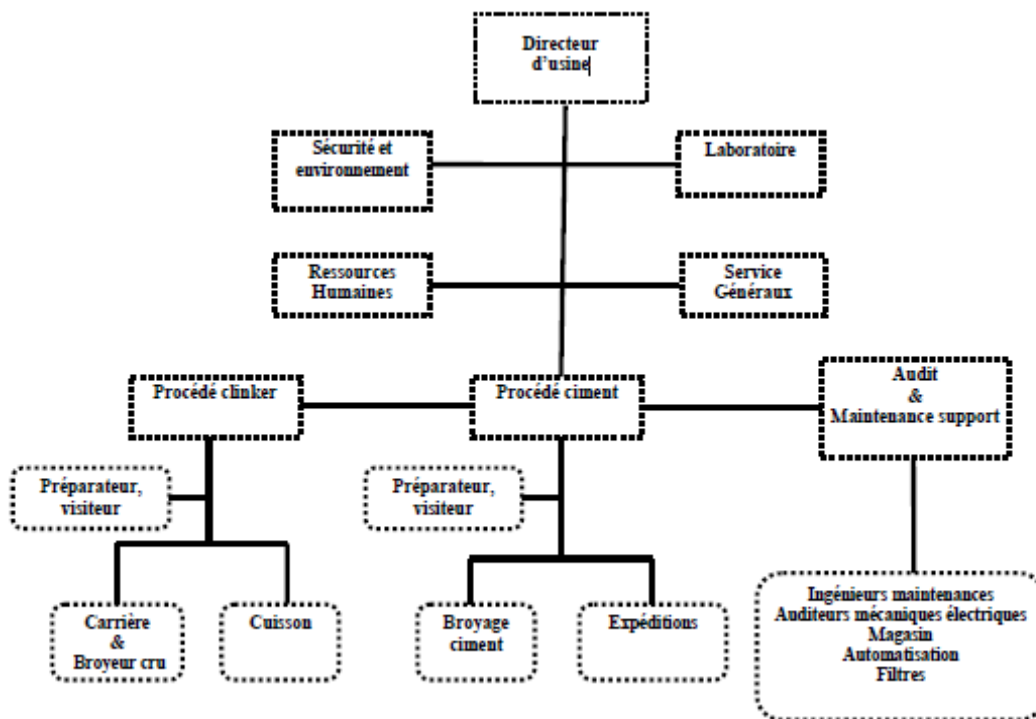


Figure 6 : Organigramme de l'usine Holcim-Fès Ras El Ma

II. Procédé de fabrication du ciment

1. Différentes voies de fabrication du ciment

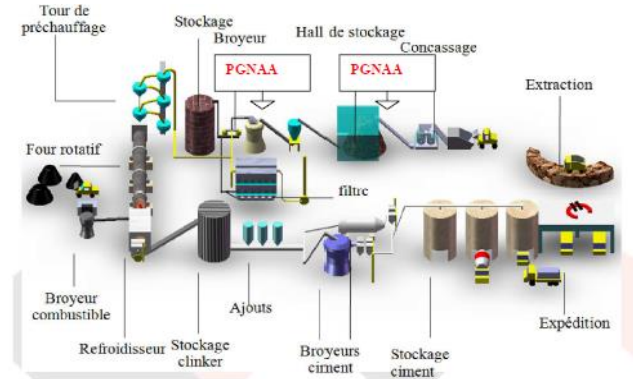


Figure 7 : Schéma du procédé de fabrication du ciment à la cimenterie de Ras El Ma

Il existe quatre procédés de fabrication du ciment qui diffèrent entre eux par la nature du produit qui alimente le four : (Voie humide / semi-humide / semi-sèche / sèche).

Voie humide : La matière première, après son concassage, est délayée dans l'eau puis broyée en humide. La pâte obtenue est soigneusement dosée et homogénéisée pour alimenter ce procédé, c'est le plus ancien et presque totalement abandonné à cause de la grande consommation énergétique.

Voie semi-humide : La pâte obtenue, de la même manière que dans le procédé de la voie humide, est débarrassée d'une grande partie de son eau par filtration avant son introduction dans le four.

Voie semi-sèche : La matière première, après son concassage, est broyée à sec, homogénéisée puis granulée par ajout d'eau à l'entrée du four.

Voie sèche : Après son concassage, la matière première est broyée à sec et homogénéisée, puis acheminée directement à l'entrée du four sous forme de farine. Ce procédé est le moins coûteux par sa faible consommation calorifique.

« Quasiment toutes les cimenteries utilisent le procédé à voie sèche qui est plus avantageux, moins coûteux et donc celui qui est utilisé à HOLCIM Ras El Ma et sur lequel on va se baser pour décrire le procédé. »

2. Procédé de fabrication par voie sèche (cas de HOLCIM Ras El Ma)

Matières premières utilisées (Calcaire, Argile, Schiste, Minerai de Fer, Fluorine, Gypse)

Les matières premières utilisées à HOLCIM : Le calcaire, l'argile, le schiste, les minerais de fer, la Fluorine et le gypse, seront décrites ci-dessous :

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, il représente 80%.

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 une roche sédimentaire, qui intervient dans le ciment par sa composition riche en alumine et silicate.

Schiste :

Le schiste est une roche métamorphique d'origine sédimentaire (souvent une argile).

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 : Ce, Si, Al, Fe, Mg, Eu, O, Cl, et des traces de composés organiques.

Gypse :

Le gypse, minéral courant composé de sulfate de calcium hydraté ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), est un minéral sédimentaire très répandu. Il est ajouté au clinker et éventuellement avec d'autres constituants au moment du broyage pour produire les ions sulfates nécessaires pour réguler la prise du ciment et améliorer les performances finales.

III. Les différentes étapes de fabrication du ciment

1. Extraction

L'extraction consiste à extraire les matières premières vierges (comme le calcaire et le schiste), à partir de carrières naturelles à ciel ouvert. Ces matières premières sont extraites des parois rocheuses par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique. Les matières premières après extraction sont acheminées par des dumpers vers le concasseur.



Figure 8 : Extraction de la matière première a partir du carrière

2. Concassage

L'atelier de concassage est situé à 50 m de la carrière calcaire. Il comprend un concasseur à marteau à double rotor, qui convient pour le concassage de toutes matières friables ou demi-dures. La marche du concasseur est entièrement automatisée, lui conférant un fonctionnement optimum et très sécurisé.

Le concasseur de débit 1500t/h peut concasser des blocs de dimensions maximales 1.3mètre.

La granulométrie des produits à la sortie du concasseur est à 99% inférieure à 100mm.

Le dépoussiérage de l'atelier de concassage, par un filtre à manches, permet la récupération des matières très fines pour les remettre dans le circuit.

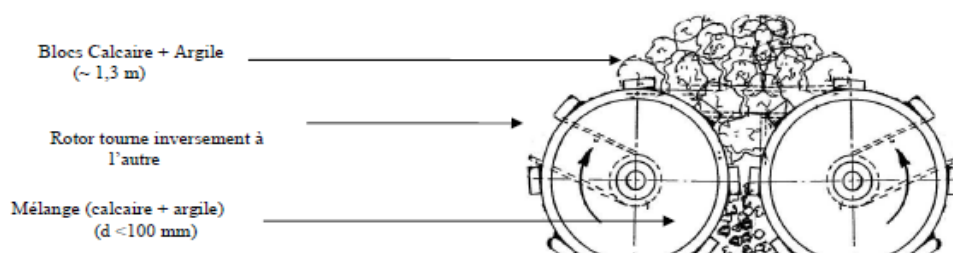


Figure 9 : Principe du concasseur à double rotor

3. Pré homogénéisation

Les blocs du calcaire et d'argile sont concassés en même temps pour donner un mélange qui est la matière principale de la fabrication du cru avec des proportions bien déterminées (78% calcaire et 22% d'argile), cette répartition est contrôlée par un PGNAA (Prompt Gamma Neutron Activation Analysis). Ce dernier donne des informations importantes sur la composition chimique du mélange et sur les proportions de chaque composé chimique, ces données vont être interprétées ensuite par la salle de contrôle du concasseur.

4. Broyage du cru

Le broyage du cru est une opération qui consiste à préparer un mélange homogène avec une bonne répartition granulométrique pour assurer les meilleures conditions de cuisson de la farine. Il consiste à l'introduire dans le broyeur à cru dans lequel il subit des actions mécaniques pour l'obtention de la farine. La farine obtenue (une poudre fine de dimension comprise entre 0 et 200 μ) est stockée par la suite dans un silo d'homogénéisation.



Figure10 : Broyeur du cru

Pour avoir une bonne composition chimique du cru 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 :

- **Taux de saturation en chaux**

Le taux de saturation en chaux détermine la quantité de chaux nécessaire pour saturer les trois autres oxydes (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃)

LSF = Lime Saturation Factor (taux de saturation en chaux)

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

- **Module silicique**

Le module silicique détermine la relation entre la quantité de SiO₂ d'une part et la quantité d'Al₂O₃ et Fe₂O₃ d'autre part. Ce rapport s'appelle, le module silicique. Il caractérise bien le produit en ce qui concerne le rapport solide / liquide en zone de cuisson.

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

- **Module aluminoferrique**

Le module aluminoferrique détermine la relation entre la quantité d'Al₂O₃ et de Fe₂O₃. Cette équation s'appelle le module aluminoferrique. Sa valeur caractérise la nature de la phase fondue, qui contient presque la totalité des 2 oxydes Al₂O₃ et Fe₂O₃.

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

Remarque :

La nomenclature utilisée dans la chimie du ciment est la suivante :

La silice (SiO₂) : La magnésie (MgO) : M

La chaux (CaO) : L'oxyde de sodium(Na₂O) : N

L'alumine (Al₂O₃) : A L'oxyde de potassium (K₂O) : K

La ferrite (Fe₂O₃) : F

L'eau (H₂O) : H

5. Homogénéisation

La farine produite est récupérée dans des transporteurs à chaîne qui alimentent un élévateur à godets et à bandes, elle est stockée par la suite dans le silo d'homogénéisation et de stockage. Le remplissage de ce silo se fait à partir d'un pot de distribution fluidisé. Ce mode d'alimentation en quatre points permet une meilleure répartition de la matière dans le silo et augmente l'efficacité de l'homogénéisation qui se fait dans un pot situé à la sortie du silo.

6. Préchauffage et Cuisson

La cuisson s'effectue selon le procédé à voie sèche intégrale. La ligne de cuisson est constituée de deux tours de préchauffage à cinq étages de cyclones et un four rotatif de 4 mètre de diamètre, de 64 mètre de longueur, un angle de 3 degré et dont la vitesse de rotation peut atteindre 5,2 tours /min.

L'air secondaire chaud qui vient du refroidisseur situé en aval pénètre dans le four en étant mélangé à l'air primaire de combustion et traverse le four à contre-courant de la matière.

La flamme résultante de la combustion du coke de pétrole se trouve à l'extrémité la plus basse du four. La matière est introduite à l'autre extrémité et avance lentement sous l'effet de la rotation et de la pente du four.

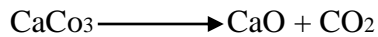
Pour protéger la virole du four et ses équipements auxiliaires et pour éviter les pertes de chaleurs importantes, le four rotatif est garni de briques réfractaires, adaptées aux nécessités de chaque zone, et au fur et à mesure de l'avancement de la matière dans le four, elle complète sa décarbonatation à une température de 1450°C. La matière qui sort du four est le clinker qui se présente sous forme de grains gris foncés arrondis dont les dimensions sont irrégulières.



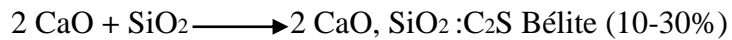
Figure 11 : Tour de préchauffage a cinq étages de cyclones

Dans le four trois phases sont a distingué

a. Phase de décarbonatation : Dissociation de CaCO_3 (400-500°C)



b. Phase transitoire ou phase liquide Caractérisée par la formation des combinaisons provisoires (900-1300°C)



1250-1300°C : Apparition de la phase liquide.

c. Phase de clinkerisation : transformation de C_2S en C_3S (1300 à 1450 °C)



Figure 12 : Four responsable de la cuisson de la farine préchauffée

7. Refroidissement

A l'aval du four, le clinker sort avec une température qui dépasse 1400 °C et chute vers 100°C dans le refroidisseur pour subir une trompe rapide afin de figer les C_3S et de les empêcher de redevenir des C_2S , ce qui influe sur la qualité du clinker en matière de sa composition et qui influe par la suite sur l'atelier de broyage : les C_2S sont difficiles à broyer. Les refroidisseurs permettent aussi de baisser la température du clinker pour faciliter la manutention et le stockage.

8. Broyage du ciment

A la fin de la cuisson, le clinker se présente sous forme de grains d'un diamètre compris entre 5 et 40 mm environ. Ces granulats seront broyés avec des ajouts (gypse, calcaire), et à des pourcentages différents selon la qualité souhaitée du ciment (CPJ35, CPJ45 et CPJ55), au niveau du broyeur 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. Dans le but d'augmenter le débit de production du ciment, l'usine HOLCIM Ras El Ma utilise deux broyeurs qui fonctionnent simultanément (BK3 et BK4) : Un broyeur à boulets d'un débit de 25 t/h. La Figure ci-dessous » et un autre broyeur vertical à galets « même génération que le broyeur Cru » d'un débit de 130 t/h assure le broyage à partir d'un mélange de clinker, calcaire et gypse.



Figure 13 : Broyeur du Clinker avec les ajouts

9. Stockage et expédition

Les expéditions comprennent le stockage du ciment et son conditionnement.

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 t/h.



Figure14 : l'expédition du ciment en vrac

Chaque catégorie est destinée à un usage particulier :

CPJ 35

Description : C'est un ciment portland (ciment pur sans ajout, constitué de Clinker et de gypse) composé dont les principaux constituants sont le Clinker et le calcaire ; Il est constitué de 67% de clinker, 28% de calcaire et 5% de gypse. Il est conforme à la norme NM 10.1.004. La classe de résistance entre 29.5 et 32 MPA.

Application : Maçonnerie.

CPJ 45

Description : C'est un ciment portland dont les principaux constituants sont le Clinker, le calcaire et le gypse. Sa composition est de 60 % en clinker, 11% en calcaire et 5% en gypse. Il est conforme à la norme NM 10.1.004. La classe de résistance entre 39.5 et 42MPA.

Application : Production des bétons armés courants et des bétons destinés aux travaux de masse.

CPJ 55

Description : Ces constituants principaux sont le Clinker, le calcaire et le gypse. Sa composition est de 76 % en clinker, 19% en calcaire et 5% en gypse. Il est conforme à la norme NM 10.1.004. La classe de résistance d'entre 50MPa et 52 MPA.

Application : Travaux nécessitant une résistance élevée.



Vrac en citerne



CPJ 45



CPJ35

Partie 2 : Partie expérimentale

Le comportement du
ciment dans le béton

I. Définition du ciment

Le ciment est une poudre minérale qui est un liant hydraulique utilisé dans différents domaines, principalement comme matériau de construction.

Tout d'abord, sont mélangés du calcaire, de schiste et des additifs tels que les minerais de fer et le sable ; ce mélange appelé "cru", est broyé et porté à haute température (~1450°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 tels que le gypse, la pouzzolane et le calcaire nous donne le ciment. Les 2 tableaux suivants résument les différents types de ciment préparé par la société Holcim ainsi leur composition et leur domaine d'utilisation :

Tableau 1 : Composition des différents ciments fabriqués par Holcim FES

Type de ciment	Composition Chimique (en %)				
	Clinker	Gypse	Calcaire	Pouzzolane	Cendre volante
CPA 55	95	5	-	-	-
CPJ 55	80	8	2	7	5
CPJ 45	70,5	6,5	3,6	14,4	5
CPJ 35	63,5	6,5	28	0	2

Tableau 2 : Principales caractéristiques et domaines d'utilisations de chaque ciment

Type de ciment	Caractéristiques	Domaine d'utilisation
CPA 55 et CPJ 55	Haute résistance (55MPa)	- La fabrication du béton armé fortement sollicité, béton précontraint et béton à haute Performance. - Décoffrage rapide.
CPJ 45	Résistance Moyenne (45MPa)	- Grands ouvrages (béton armé fortement sollicité et à résistance mécanique élevée).
CPJ 35	Faible résistance (35MPa)	- 90% dans les travaux de maçonnerie - 10% dans les grands ouvrages

II. Contrôle qualité du ciment

Les résultats des contrôles effectués au sein du laboratoire sont utilisés pour la correction des consignes des doseurs et que rectifie automatiquement la salle de contrôle. Dans le laboratoire de HOLCIM Ras El Ma, on trouve les différentes procédures chimiques et physiques nécessaires pour effectuer ces contrôles.

1. Essais chimiques

a. Analyse par spectrométrie de fluorescence-X

Le principe de cette analyse consiste à sur-broyer l'échantillon à analyser dans un sur-broyeur pour avoir des granulats de dimension très fins. Après traitement, L'ordinateur ensuite affiche le pourcentage en chaque constituant. Les résultats de ces contrôles sont utilisés pour la correction des consignes des doseurs qui sont rectifiées automatiquement par la salle de contrôle et pour suivre la conformité du produit durant tout le procédé.



Figure 15 : Spectromètre de fluorescence-X

b. Détermination de la teneur en fluorine

La fluorine est la plus chère des matières premières entrant dans la composition du mélange cru. L'ajout de la fluorine comme agent minéralisateur permet de baisser la température de cuisson du clinker, améliorer sa qualité, et par la suite réduire les dépenses énergétiques et le coût de la tonne du ciment (utiliser moins de clinker minéralisé (plus réactif) dans le ciment).



Figure 16 : Le Potentiomètre utilisé à HOLCIM

c. Détermination de la teneur en chlorure

Le principe repose sur le dosage potentiométrique. Le titrage se fait par une électrode d'argent et une solution d'AgNO₃ servant à précipiter les ions chlorures présents dans l'échantillon analysé sous forme d'AgCl selon la réaction suivante :



Figure 17 : Dosage des chlorures

d. Finesse

L'objectif de la finesse 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.

Expression de résultats :

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

- m₁ : poids pesé avant tamisage.
- m₂ : poids pesé 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.

e. Perte au feu

La Perte au feu nous permet de déterminer la teneur en H₂O et CO₂ présent dans la farine traitée et qui était évacué pendant un traitement thermique dans un four à moufle pendant 20 min.

$$\text{P.A.F (\%)} = \frac{(m_1+m_2-m_3)}{m_2} * 100$$

m₁ : masse du creuset en (g)

m₂ : prise d'essai en (g)

m₃ : poids du creuset + prise d'essai après calcination en (g)



Figure 18 : Le four permettant le calcul de la perte au feu

2. Essais physiques et mécaniques

a. Essai de prise

L'essai de prise par l'appareil de VICAT est composé essentiellement d'un piston vertical, muni à son sommet d'un plateau destiné à recevoir une charge amovible ou éventuellement des poids et portant un curseur se déplaçant devant une graduation à sa partie inférieure à chaque 10 min afin de déterminé le temps au bout duquel le ciment commence à durcir.

On distingue 2 phases : Prise Initiale et Finale.



Figure 19 : Appareil de Vicat

b. Résistance à la flexion et à la compression

La résistance à la flexion et à la compression a comme objectif de mesurer les résistances à la compression et la flexion du mortier. On prépare des éprouvettes du ciment de dimensions bien définies et on calcul leur résistance à l'aide de l'appareil presse Ibertest après qu'elles étaient plongé dans l'eau pendant 2 ,7 et 28 jours



Figure 20 : Appareil presse IBERTEST et le moule préparé

III. Définition du Béton

Le béton est né du besoin d'avoir un matériau de construction bon marché, malléable au moment de le mettre en place et résistant.

Le béton est un matériel constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable) de ciment et d'eau. Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit. La pâte de ciment hydraté et le sable constituent le mortier. Celui-ci a pour rôle de se lier avec les gros granulats pour former un conglomérat solide. Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.



Figure 21 : Prise et durcissement du béton

1. Classification des bétons

Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs Catégories. En général le béton peut être classé en trois groupes selon sa masse volumique :

- Béton normal : ρ entre 2600 et 2800 kg /m
- Béton lourd : $\rho > 2600$ kg/m
- Béton léger : ρ entre 800 et 2000 kg/m

Le béton peut varier en fonction :

- des granulats,
- des adjuvants / des colorants et des traitements de surface.

Il peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect.

2. Constituants du béton

c. Granulats

Selon un concept traditionnel, les granulats constituent le squelette du béton. Ceux, qui sont généralement moins déformables que la matrice de ciment, s'opposent à la propagation des microfissures. Ils améliorent ainsi la résistance du béton.

Le choix d'un granulats est donc un facteur important de la composition du béton, qui doit toujours être étudiée en fonction des performances attendues, spécialement sur le plan de la durabilité.

De nombreuses caractéristiques des granulats sont testées comme la masse volumique, la propreté, la forme, la composition...

Il existe différents types de granulats :

➤ *Les granulats roulés*

Les granulats alluvionnaires (dits roulés) ont une forme arrondie due à l'érosion.

➤ *Les granulats de carrières*

Les granulats de carrière sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires.

➤ *Les granulats artificiels :*

Par exemple, il peut être intéressant d'utiliser des granulats très légers (bois, polystyrène expansé). On voit donc leur intérêt pour la réalisation d'éléments légers : Blocs coffrant, blocs de remplissage, dalles, ou rechargements sur planchers peu résistants.



Figure 22 : différents types de granulats

d. Les adjuvants

Dès les origines de la fabrication du béton de ciment Portland, commencent des recherches sur l'incorporation de produits susceptibles d'améliorer certaines de ses propriétés.

On cherche à agir sur :

- les temps de prise,
- les caractéristiques mécaniques,
- et de sa mise en œuvre et l'étanchéité.

Ces adjuvants ont pour fonction principale, soit : - d'améliorer l'ouvrabilité du béton,
- d'améliorer les résistances mécaniques.

Leurs dosages sont compris entre 0,4 et 3% du poids de ciment.

IV. Comportement du ciment dans le béton

Les étapes de concassage, broyage, homogénéisation, et cuisson de cru (mélange des matières premières à la température environ 1400°C), nous donne le produit « clinker » qui est l'origine des caractéristiques hydrauliques du ciment.

Le ciment est le « produit fini » qui résulte du broyage du clinker et les ajouts (gypse, pouzzolane, calcaire, cendres volants), bien que le ciment dont les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques répondent à la norme en vigueur, devrait être une assurance pour l'obtention d'un béton de bonne qualité.

Afin d'optimiser les moyens matériels et humains et standardiser les essais qui anticipent le comportement du ciment dans le béton, le laboratoire de la cimenterie de FES s'est doté d'un équipement dit « cône Holcim » dont les résultats devraient nous donner des indications fiables sur la maniabilité du béton (slump) et les caractéristiques physiques de la résistance.

Notre travail se limitera donc à la réalisation des essais sur le cône HOLCIM, afin de faire des corrélations (avec les mêmes ciments) entre les essais du laboratoire ciment et ceux du laboratoire béton.

➤ Cône HOLCIM

1. Définition

Au cours des années 1980 -1990, les études relatives aux bétons à hautes performances ont montré le rôle néfaste de l'excès d'eau dans les bétons. La réduction de cette quantité d'eau par emploi d'agents réducteurs et par correction de l'empilement granulaire via les ultrafines a conduit aux gains de résistance et de durabilité.

En prolongement de ces travaux scientifiques, l'amélioration constatée de l'ouvrabilité de ces nouveaux bétons a conduit les chercheurs à développer et à fiabiliser cette propriété. Ce qui nous a dirigé de réaliser cette analyse pour une corrélation entre les ciments fabriqués en société et mélangés dans les chantiers pour les ouvrages de constructions des bâtiments.

La réalisation de cette étude nécessite un ensemble de matériels pour la préparation de la pâte du cône HOLCIM. En général, ce matériel est utilisé dans les analyses quotidiennes au sein du laboratoire.



Figure 23 : Cône Holcim

2. Mode opératoire de l'utilisation du cône d'HOLCIM :

- La quantité d'eau, ciment et le sable normalisé requis pour préparer le mortier est calculée en respectant la norme (Eau/Ciment = 0,5).
- l'eau ajoutée est mélangée avec l'adjuvant (la norme indique que l'adjuvant représente 0,4% du ciment).
- Mettre le ciment et l'eau dans le récipient du malaxeur et mélanger.



Figure 24 : Malaxeur

- Cesser de mélanger pendant une minute afin de nettoyer avec la spatule le ciment collé sur les parois du récipient.
- Mélanger le ciment + (eau + adjuvant) à la vitesse appropriée tout en ajoutant le sable (Le sable utilisé est un sable normalisé, certifié conforme EN 196-1 - ISO, conforme ISO 679 : 2009)
- Mesurer la température du mortier.
- Mesurer l'écoulement de récession avec le cône de HOLCIM à 15 minutes du gâchage initial. (Bien remplir le cône en tassant 15 fois à l'aide d'un marteau en caoutchouc).
- Le reste du mortier est remis dans un sac en plastique pendant 45 minutes.
- Après ces 45 minutes mélanger le mortier à la vitesse appropriée et répéter l'écoulement de récession à 45 minutes du gâchage initial en prenant la température du mortier.
- Mesurer la distance de détention du slump par un portique de mesure.



Figure 25 : Portique de mesure

3. Caractéristiques du sable normalisé

C'est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toute garantie de qualité et de régularité.



Figure : 26 Sable normalisé

4. Problématique

Comme il est connu, chez toute industrie du ciment, l'étape marquante dans le processus de fabrication de cette dernière est d'obtenir le Clinker avant de lui ajouter les autres matières afin de le transformer en Ciment et par la suite en béton. Alors, au four, et au cours de formation du Clinker, apparaît un autre produit qui n'était pas totalement cuit que l'on appelle « Clinker incuit » qui sera jeté après. Par la suite le grand perdant est la société, pour cela on va chercher une méthode avec laquelle on peut récupérer et utiliser ce clinker incuit.



Figure 27 : Préparation du béton avec une quantité importante du Clinker

5. Effectué

Donc avant de commencer à travailler avec le cône Holcim, d'abord on va préparer un ciment CPJ 55 (80% Clinker 8% Gypse, 2% calcaire, 7% de Pouzzolane) avec E/C =0.5

Ciment : 1213 g

Eau : 606.5 g

Sable normalisé : 2700 g

Tableau 3 : Différentes matières utilisées pour la préparation du ciment.

<i>Matière</i>	<i>Poids g</i>
<i>Clinker</i>	<i>970.4</i>
<i>Gypse</i>	<i>97.04</i>
<i>Calcaire</i>	<i>24.26</i>
<i>Pouzzolane</i>	<i>84.91</i>

Comme on vient de citer. Le ciment est constitué du clinker, ou plutôt ce dernier est la matière principale du ciment, donc la qualité du ciment dépend de la qualité du clinker utilisé.

Du coup, on va préparer un ciment CPJ 55 avec différentes qualités de clinker et on va distinguer l'effet de ce dernier sur le béton.

D'abord on va faire des essais sur le cône holcim et on va calculer l'écoulement trouvé pour chaque qualité à 15 et 45N min et on va noter la différence de dispersement et par la suite déduire l'influence du temps sur la nature de béton.

Avant tout, il est conseillé de faire des analyses de nos échantillons avec lesquels on va travailler sur Cristallographie aux rayons X, afin de bien savoir les composants de chacun de nos produits, ainsi leurs pourcentages.

Le tableau ci-après nous trace les analyses effectuées sur 5 échantillons :

Tableau 4 : Analyse des échantillons sur Cristallographie aux rayons X

Composé chimique	Calcaire	Gypse	Clinker mauvaise qualité	Clinker bonne qualité	CPJ55
SIO ₂ (%)	5.58	15.79	20.45	20.65	17.17
Al ₂ O ₃ (%)	1.86	3.89	5.32	5.4	5.45
Fe ₂ O ₃ (%)	0.91	1.9	4.35	2.97	2.57
CaCO ₃ (%)	50.07	28.65	63.41	66.2	64.77
MgO (%)	0.57	3.76	1.71	1.10	1.25
SO ₃ (%)	0.45	0.48	2.10	1.64	2.83
LSF (%)	271	-----	108.3	100.1	-----
CaO libre (%)	-----	-----	10.6	1.22	-----

Le Clinker est le produit semi fini (la base du ciment) qui assure toutes les qualités intrinsèques du Ciment.

Toute fois la cimenterie pour une raison ou une autre peut produire un Clinker de moyenne ou de mauvaise qualité.

Ce dernier (Clinker de mauvaise qualité) fera l'objet de notre étude sur l'impact de la qualité du ciment et par la suite son comportement lors de la préparation du béton.

Holcim Maroc, Usine de Fès est équipée d'un matériel propre au groupe (Holcim Côte) qui permet le suivi du comportement du ciment lors de la préparation du béton.

Pour ce faire, et en référence par rapport à un béton normal (préparé par un ciment de bonne qualité), nous avons préparé différentes quantités de ciment CPJ55 avec des proportions d'incuit allant de 5 à 25%.

Le tableau suivant résume les résultats des différents essais réalisés après 15 et 45 min du gâchage. (La finesse du ciment préparé est de 4.6%, alors que celle du clinker est de 5%).

<i>Ciment avec différent quantité de clinker</i>	<i>Après 15 min</i>	<i>Après 45 min</i>
<i>100 % bonne qualité</i>	160.5	151.2
<i>95%% bonne qualité avec 5% incuit</i>	150.04	146.2
<i>90% bonne qualité +10% d'incuit</i>	130.54	122.8
<i>85% bonne qualité +15% d'incuit</i>	111.24	105
<i>80% bonne qualité +20% d'incuit</i>	103.21	100
<i>75% bonne qualité +25% d'incuit</i>	100.2	100
<i>70% bonne qualité +30% d'incuit</i>	95	93
<i>65% bonne qualité +35% d'incuit</i>	90	89
<i>60% bonne qualité +40% d'incuit</i>	85	80

Tableau 5 : Test sur différentes qualités du ciment sur la Cône d'Holcim.

6. Interprétations des résultats

Le ciment de référence (0% D'incuits) a des slumps respectivement après 15 et 45 min de 160 à 151mm.

Le slump se dégrade après augmentation progressive de la masse d'incuit dans le ciment.

Nous déduisons donc que la maniabilité du béton est de plus en plus difficile avec ajout d'incuit dans le ciment.

D'après le tableau du DRX on constate que la chaux (CaO) libre est élevée dans le clinker incuit à (11.5%) par contre le clinker de bonne qualité à (1.22%), pour cela le clinker incuit nous donne un ciment de mauvaise qualité, ceci est dû essentiellement à la forte teneur en eau qui est liée directement au % d'incuit.

7. Solution proposée

A titre de conclusion, le ciment qui servira pour la préparation du béton ne devra être préparé en aucun cas d'un ciment de mauvaise qualité (plus de 5% d'incuit) vu que ce dernier peut conférer au ciment une nécessité de forte demande en gâchage qui peut dégrader la résistance mécanique du béton.

Et donc, pour résoudre notre problème et économiser le taux de rejet d'incuit, il est possible d'ajouter 5% de ce dernier à un ciment de bonne qualité. Cette dose n'influence pas négativement sur la qualité et la texture du ciment.

Il est à rappeler que la quantité d'eau dans le ciment est $E/C = 0,5$.

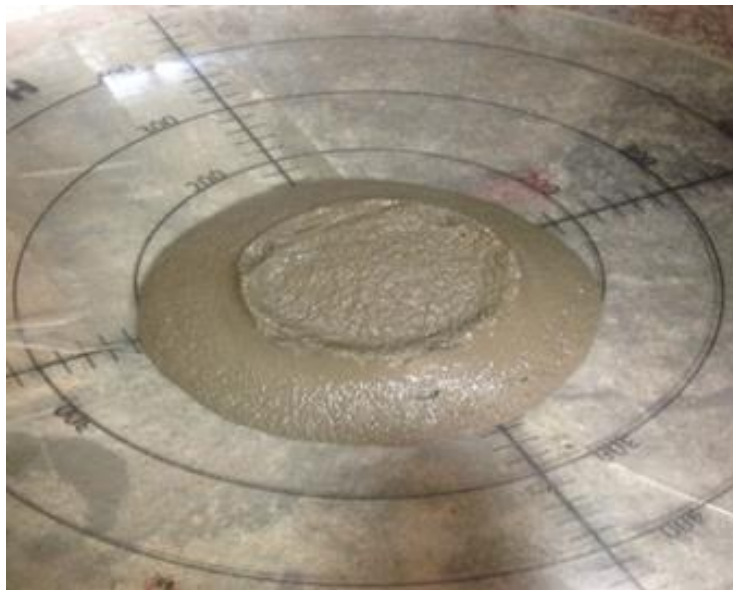


Figure 28 : Béton préparé avec une quantité bien étudiée de clinker

CONCLUSION :

Au sein de la société dont j'ai effectué mon stage, le principe des travaux effectués est de produire un ciment qui répond aux exigences des différents types de commandes des clients. Pour cela, l'usine de Holcim Ras El Ma, se trouve dans la nécessité d'assurer les différents types de ciment afin de satisfaire tout le marché clientèle en produisant le ciment portland CPJ 35 qui est utilisé dans la plupart des travaux de maçonneries, Le CPJ 45 pour la production des bétons armés courants et des bétons destinés aux travaux de masse et le CPJ 55 pour les travaux nécessitant une résistance élevée.

L'étape critique dans le processus de fabrication du ciment est celle de la fabrication du clinker. Dans le four, on se trouve dans la nécessité d'obtenir un clinker non cuit que l'on appelle Clinker « Incuit » qui sera jeté par la suite. Du coup, le seul perdant est la société elle-même. A la lumière de cette problématique, mon travail étudie la solution qui peut minimiser ces pertes, et de profiter le maximum possible de ce clinker incuit à des proportions bien définies tout en gardant la bonne qualité du ciment et ne pas influencer sa maniabilité.

En plus, j'ai pu constater la différence entre la théorie et le monde du travail, et que la vie pratique de l'entreprise mérite plus d'expérience, de savoir-faire qu'on peut acquérir avec le temps et le contact direct avec les problèmes.

Bibliographie et Webographie

Bibliographie :

[1] *Chimie Industrielle de Bernard Lefrançais*

[2] *Chimie général (Raymond Chang)*

[3] *Chimie Général (Mc Quarrie Rock)*

[4] *Etude granulométrique des tranches du clinker (Jihane Babaya Caq Master FST)*

[5] *Rapport de chimie clinker et ciment (monsieur Ayadi Abdelaziz) ciment | chef du laboratoire de Holcim*

Webographie :

[1] <http://www.holcim.co.ma/decouvrez-nous/prendre-contact/address/direction-usine-fes.html>

[2] <http://www.leroymerlin.fr/v3/p/produits/materiaux-menuiserie/gros-oeuvre/poudre-beton-chaux-ciment-enduit-mortier-ragreage/beton-et-mortier-11308218166>

[3] <http://www.tunisieindustrie.nat.tn/fr/download/idees/IMCCV/18.pdf>