



Licence Sciences et Techniques (LST)

GENIE CHIMIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

L'optimisation du gypse dans le CPJ 45

Présenté par :

- ◆ Esslimani Khaoula

Encadré par :

- ◆ Mr AYADI Abdelaziz (LafargeHolcim)
- ◆ Pr SKALLI Mohammed Khalid (FST)

Soutenu Le **09 Juin 2017** devant le jury composé de:

- Pr SKALLI Mohammed Khalid
- Pr CHAOUQI Mohammed
- Pr FARAH Abdellah
- Mr AYADI Abdelaziz (LafargeHolcim)

Stage effectué à **LafargeHolcim**

Année Universitaire **2016 / 2017**

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES FES – SAISS

☒ 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>

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 frères,

Au près de qui j'ai trouvé la force et le courage de continuer.

A ma famille, et mes amis,

Qui ont accompagné mes joies et mes incertitudes tant le long de ma formation.

A tous ceux qui ont très chers.

Remerciements :

Je remercie toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail, notamment :

Mon encadrant Pr. MOHAMMED KHALID SKALLI, dont les orientations précieuses ont savamment balisé ma recherche.

Le chef du laboratoire de contrôle de qualité Mr. AYADI ABDELAZIZ, qui a supervisé mon stage avec la patience d'un maître et la sollicitude d'un père.

Je remercie également l'ensemble de jury, qu'il me soit permis de vous témoigner toute ma gratitude et mon profond respect d'avoir aimablement accepté de juger ce mémoire.

Mes sincères remerciements s'adressent également à l'ensemble du personnel du service laboratoire contrôle de qualité pour m'avoir accueillie au sein de leur équipe, pour leur aide pratique et inconditionnelle et leur sympathie.

Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail, qu'ils puissent trouver ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Liste d'abréviation :

ISO : Organisation internationale de normalisation

PI : Prise initiale

PF : Prise finale

RC : Résistance

REM : Ras El Ma

EG : Eau de gâchage

RX : Rayon X

La silice (SiO_2) : S

La magnésie (MgO) : M

La chaux (CaO) : C

L'oxyde de sodium(NaO) : N

L'alumine (Al_2O_3) : A

L'oxyde de potassium (K_2O) : K

La ferrite (Fe_2O_3) : F

L'eau (H_2O) : H

Liste des figures :

Figure 1 : Schéma de procédé de fabrication de ciment à REM.....	8
Figure 2 : Extraction de la matière première à partir de la carrière.....	8
Figure 3 : Principe du concasseur à double rotor.....	9
Figure 4 : Broyeur du cru.....	11
Figure 5 : Dépoussiéreur.....	12
Figure 6 : Tour de préchauffage.....	13
Figure 7 : Four rotatif.....	14
Figure 8 : Phase de cuisson.....	14
Figure 9 : Refroidisseur.....	15
Figure 10 : Broyage du clinker avec ajouts.....	16
Figure 11 : Expédition du ciment.....	17
Figure 12 : Four à moufle.....	18
Figure 13 : Potentiomètre.....	18
Figure 14 : Titreur des ions de chlorures.....	18
Figure 15 : Tamiseur.....	19
Figure 16 : Préparation et analyse des échantillons dans le spectromètre.....	20
Figure 17 : Appareillage d'essai à aiguille de Vicat.....	20
Figure 18 : Aiguille de Lechatelier.....	21
Figure 19 : Bouillard Lechatelier.....	21
Figure 20 : Appareil de Vicat.....	21
Figure 21 : Malaxeur.....	22
Figure 22 : Bol des moules.....	22
Figure 23 : Table à choc.....	22
Figure 24 : Moules de ciment.....	22
Figure 25 : Appareil de résistance.....	22

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Composition chimiques du ciment CPJ 35.....	7
Tableau 2 : Composition chimiques de ciment CPJ 45.....	7
Tableau 3 : Composition chimiques de ciments CPJ 55.....	7
Tableau 4 : Pourcentage des éléments chimiques du cru.....	11
Tableau 5 : Rôle des composants du clinker dans le ciment.....	15
Tableau 6 : Analyses chimiques de CPJ 45 avec 3 % de gypse.....	28
Tableau 7 : Analyses chimiques de CPJ 45 avec 4% de gypse.....	28
Tableau 8 : Analyses chimiques de CPJ 45 avec 6% de gypse.....	28
Tableau 9 : Analyses chimiques de CPJ 45 avec 8 % de gypse.....	29
Tableau 10 : Analyses chimiques des moyennes.....	29

Sommaire :

Introduction	1
Chapitre 1 : Présentation de Holcim Maroc.....	2
I-Présentation générale.....	2
1- Groupe international.....	2
2- Holcim Maroc.....	2
3- Historique.....	2
4-LafargeHolcim, Fès.....	3
4.1- Généralité	3
4.2- Organigramme.....	4
4.3- Objectifs.....	4
4.4- Choix de site.....	4
5- Les différents services de LafargeHolcim.....	5
Chapitre 2 : Généralité sur le ciment et son procédé de fabrication.....	6
I-Généralités sur le ciment.....	6
1-Définition.....	6
2- Les voies de fabrication du ciment.....	6
3- Différent types du ciment produit par Holcim.....	7
3.1- CPJ 35.....	7
3.2- CPJ 45.....	7
3.3- CPJ 55.....	7
II- Procédé de fabrication du ciment.....	8
1-Extraction de la matière première.....	8
2- Concasseur.....	9
3- Transport.....	9
4- Pré-homogénéisation.....	9
5- Broyage de cru.....	9
6-Dépoussiérage.....	12
7-Homogénéisation.....	13
8-Le préchauffage.....	13
9-Cuisson dans le four.....	14
10-Refroidissement.....	15
11-Broyage du ciment.....	16
12- Stockage et expédition.....	17
II-Techniques d'analyse et contrôle de qualité.....	17
1-Essais chimique.....	17
1.1- La perte eu feu.....	17

1.2- Détermination de la teneur en fluorine.....	18
1.3- Détermination de la teneur en chlorure.....	18
1.4- La finesse.....	19
1.5- Analyse par spectrométrie de fluorescence-X.....	19
2- Essais physique et mécanique.....	20
2.1- La prise.....	20
2.2- Essai d'expansion.....	21
2.3- Essai de consistance	21
2.4- Essais mécaniques : Résistance à la flexion et à la compression.....	22
Chapitre III : L'optimisation du gypse dans le ciment.....	24
I-Introduction.....	24
II- L'optimisation du SO ₃ dans le ciment.....	24
1- Définition du gypse.....	24
2- Caractéristiques du ciment portland	24
2.1- Hydratation du ciment.....	24
2.2- Cinétique et chaleur d'hydratation.....	25
2.3- La prise.....	25
2.4- L'eau de gâchage.....	26
3- L'influence du gypse sur le ciment.....	26
III- Procédé expérimental.....	27
1- Procédé d'essai.....	27
2- Résultats expérimentales.....	28
2.1- Analyses du spectromètre à RX, finesse et perte au feu.....	28
2.2- Analyses de prise initiale, finale et de résistance.....	29
Conclusion.....	32

INTRODUCTION :

L'industrie marocaine du ciment a constamment répondu au développement quantitatif des besoins et à l'évolution qualitative du marché grâce à la modernité de ses centres de production et par l'ouverture de son capital à l'investissement privé national et étranger.

Le Secteur Marocain compte quatre grandes entreprises qui exploitent un total de 11 usines pouvant produire annuellement plus de 10 Millions de tonnes. Le Groupe HOLCIM (Maroc) est un leader dans ce secteur.

Le principal constituant du ciment reste le clinker et de sa qualité dépend étroitement celle du ciment en entier. A la société HOLCIM, il arrive parfois que le clinker soit incuit après sa sortie du four, ce qui est nuisible pour la qualité du ciment et du béton dans lequel il est impliqué. La société procède dans ce cas au rejet du clinker incuit et ceci constitue une partie significative

Mon stage de fin d'étude s'est déroulé au sein de l'entreprise LAFARGEHOLCIM Ras El Ma du 10 avril au 28 Mai ,afin de me faire découvrir comme aux autres étudiants la vie professionnelle , de me confronter à l'organisation de l'entreprise et avoir un esprit observateur et critique vis-à-vis de l'environnement qui nous entoure.

La découverte de l'entreprise m'a montré un aspect intéressant du milieu du contrôle de qualité route. Ainsi, le sujet qui m'a été proposé portait le thème : « ***Optimisation du gypse dans le ciment*** ».

Par ailleurs, mon stage se déclinera en trois parties :

Je commencerai dans un premier temps par la présentation de la société LafargeHolcim, je présenterai ensuite une généralité sur le ciment et la méthode de sa fabrication à l'usine Ras El Ma. La dernière partie expérimentale sera entièrement axée sur l'optimisation du gypse dans le CPJ 45.

Chapitre I : Présentation de Holcim Maroc

I-Présentation générale :

1- Groupe international :

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.

D'origine suisse fondée en 1912, le groupe Holcim est un acteur majeur au niveau mondial dans la production du ciment granulats et bétons, le groupe est aujourd'hui présent sur les 5 continents dans près de 70 pays à travers le monde et emploie près de 80.000 personnes.

Holcim a développé donc un savoir-faire unique au niveau mondial dans ces métiers pour devenir un acteur incontournable dans la production de matériaux de construction.

Le groupe Holcim offre la plus grande diversité géographique du marché. Présent aussi bien en Europe que dans les pays émergents, sa diversification géographique assure la solidité de son économie.

2- Holcim Maroc :

Aujourd'hui Holcim est présente dans différentes régions du Maroc et dispose d'une capacité annuelle de production de 4.4 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.

3- Historique :

En 1972 les gouvernements marocain et algérien décident de construire une cimenterie à Oujda, sous le nom de la Cimenterie Maghrébine (CIMA). Son capital social est de 75 millions de dirhams, réparti à égalité entre l'Office pour le Développement Industriel (ODI) et la Société Nationale des Matériaux de Construction (SNMC), organismes représentant respectivement le Maroc et l'Algérie. Le projet CIMA fut mis en veilleuse et placé sous administration provisoire à cause du retrait algérien de l'opération en 1975.

1976 : L'ODI crée une société nouvelle dénommée Cimenterie de l'Oriental (CIOR) qui reprend les actifs de la CIMA avec pour objet la réalisation d'une cimenterie dans la région d'Oujda.

1980 : Installation à Fès d'un centre d'ensachage d'une capacité de 500 000 tonnes par an.

1985 : Création de Ciments Blanc du Maroc à Casablanca.

1989 : Installation d'un centre de broyage à Fès d'une capacité de 350 000 tonnes par an.

1990 : Début des travaux pour la réalisation d'une ligne complète de production de clinker à Fès.

1993 : Démarrage de l'unité de Fès.

2001 : Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 de la cimenterie de Fès.

2002 : Changement de l'identité visuelle: CIOR devient Holcim Maroc. Démarrage de la nouvelle activité granulats (Benslimane). Début des investissements relatifs à la rationalisation du dispositif industriel de Fès.

Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 de la cimenterie d'Oujda.

2004 : Extension de la cimenterie de Fès.

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

2008 : Lancement du projet de doublement de capacité de production de l'usine de Fès.

2010 : Lancement du projet de doublement de la capacité de production clinker de la cimenterie de Fès.

2012 : Doublement de la capacité de production clinker de l'usine de Fès.

2014 : Holcim annonce la fusion entre cette dernière et Lafarge Maroc.

4- LafargeHolcim Fès, Ras El Ma :

4.1- Généralités :

Située à 25 Km au sud de Fès, l'usine de Fès utilise le procédé de fabrication à voie sèche intégrale avec une capacité annuelle de 1.2 million de tonnes, il comporte des ateliers de : Concassage, broyage, stockage de la farine, cuisson, stockage du clinker, broyage des combustibles, broyage du ciment, ensachage et expédition du ciment. La cimenterie de Fès est certifiées ISO 9001 version 2008 et ISO 14001 version 2004.

La cimenterie de Ras El Ma travaille dans le plus strict respect des exigences environnementales, notamment par la mise en place :

- Des systèmes de dépoussiérage performants.
- D'un réseau d'assainissement moderne.
- D'un dispositif renforcé de prévention et de lutte contre les incendies.

- La possibilité d'alimentation en énergie (l'électrifié est alimentée par l'ONEP).
- La qualité des terrains de point de vue fondation et écoulement de la production et l'approvisionnement de la cimenterie.

5-Les différents services de LafargeHolcim :

Les services de LafargeHolcim travaillent en collaboration entre eux , comme c'est indiqué par l'organigramme .On procédera à une analyse détaillée des différents services de l'usine :

Les services de ressources humaines :

Il assure la communication entre la direction et l'administration, la mise en œuvre de la sécurité et la formation pour le seul but qui est la modernisation et le développement de l'usine.

Le service de maintenance :

Il assure la gestion du stock du matériel et l'outillage de travail; en les classent selon 2 types : matériel électronique et matériel mécanique.

Le service de comptabilité :

Il se charge d'établir la comptabilité d'exploitation qui les éléments constitutifs des coûts de revient et détermine ainsi les prix des ventes .Il sa charge aussi du contrôle : traitement des différents mouvements des fonds de l'entreprise en distinguant leurs affectations.

Le service contrôle de qualité :

Il a pour objectifs de contrôler l'exploitation et la fabrication du clinker et du ciment, il a pour mission principale :

- Le contrôle chimique de la composition du ciment.
- Le contrôle physique du produit final.

***Chapitre II : Généralités sur
le ciment et son procédé
de fabrication***

I-Généralités sur le ciment :

1-Définition :

Le ciment est un produit moulu issu de refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450 -1550°C, température de fusion.

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau formant une pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

L'expression de « pâte de ciment durcissant » sera utilisée pour désigner la pâte de ciment dans la transformation d'un état plus ou moins fluide en un état solide.

Les principaux composants du ciment sont :

- **Le clinker** : produit par la cuisson du mélange : calcaire +gypse+ajouts.

Il est constitué principalement d'oxydes métalliques, les quatre composants essentiels sont :

- ◇ La silice (SiO_2) : 17 à 25%
- ◇ L'alumine (Al_2O_3) : 3 à 6 %
- ◇ La chaux (CaO) : 54 à 65 %
- ◇ L'oxyde de Fer (Fe_2O_3) : 2 à 5 %

Suivant leur type, les ciments courants peuvent contenir les autres constituants suivants :

- **Les cendres volantes** : produit obtenu par la combustion des houilles et lignites dans les centrales thermiques.
- **Les pouzzolanes** : produit d'origine volcanique.
- **Les ajouts chimiques de fabrication** : sulfate de calcium (gypse), agents de mouture ...

2- Les voies de fabrication du ciment :

Il existe 4 principaux procédés de fabrication du ciment : la voie humide, semi-humide, semi-sèche et la voie sèche qui diffèrent entre eux par la nature du traitement thermique utilisé. Dans LafargeHolcim REM on utilise la voie sèche.

◇ 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.

3- Différent types du ciment produit par Holcim :

3.1 – CPJ 35 : (Ciment Portland aux Ajouts 35)

Le CPJ 35 est un produit particulièrement adapté à la fabrication des mortiers et enduits pour la maçonnerie ainsi que des bétons non armés peu sollicités et à résistance mécanique peu élevés, elle contient un pourcentage minimum en clinker 65% ,alors que le reste est constitué de (calcaire et gypse) .

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃
CPJ 35	13 ,6	3,67	2,45	64,99	1,15	0,57	2,98

Tableau 1 : Composition chimique du ciment CPJ 35.

3.2-CPJ 45 :

Le CPJ 45 est un ciment portland dont les constituants principaux sont : le clinker (70%), le calcaire, le gypse et la pouzzolane .La classe de résistance de 45 Méga pascals lui confère l’aptitude à être utilisé pour les bétons armés fortement sollicités et à résistances mécaniques élevées. Ces résistances permettent d’obtenir un décoffrage rapide des éléments de structure et des produits préfabriqués.

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃
CPJ 45	22 ,31	6,76	4,61	52,57	2,78	0,82	3,01

Tableau 2 : Composition chimique de ciment CPJ 45.

3.3-CPJ 55 :

Le CPJ 55 est un ciment portland artificiel composé de clinker, calcaire, gypse, pouzzolane et les cendres volantes. La classe de résistance 55 MPa et les résistances élevées à jeune âge du CPJ 55 lui confèrent l’aptitude à être utilisé pour des applications spécifiques telles que les bétons armés fortement sollicités.

Le CPJ 55 est adaptés aux applications de la préfabrication nécessitant un décoffrage rapide et un durcissement accéléré.

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃
CPJ 55	13,85	5,56	3,44	59,05	1,87	0,69	3,21

Tableau 3 : Composition chimique de ciments CPJ 55.

II- Procédé de fabrication du ciment à Holcim Ras El Ma :

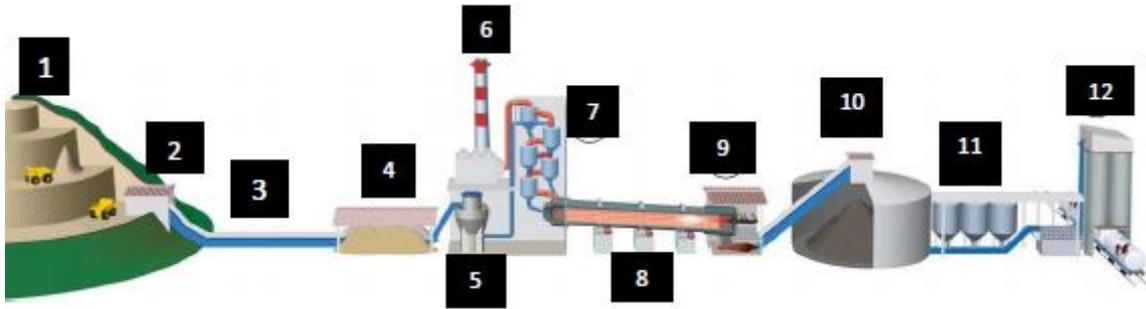


Fig1 : Schéma de procédé de fabrication de ciment à REM

1- Extraction de la matière première :

Dans l'industrie de ciment, le choix de site des usines n'est pas du au hasard mais répond à éviter les contraintes économiques.

La carrière en cimenterie constitue la source en matières premières, lesquelles subiront des transformations pour fabriquer le produit ciment. Les matières doivent contenir certains éléments chimiques (carbonates de calcium, oxyde de fer, Alumine et Silice), généralement ces matières sont :

- Calcaire :

L'extraction du calcaire représente 70% du tonnage de matières premières et nécessite l'emploi d'explosif .Il est extrait des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert à proximité de l'usine par abatage à l'explosif.



Fig 2: Extraction de la matière première à partir de la carrière.

- Le schiste :

Il représente 5% du mélange et livré à partir d'une carrière de Holcim situé dans la zone de Sefrou (Bhalil).

- La fluorine :

C'est une espèce minérale composée de fluorure de calcium de formule CaF_2 et apportée d'un gisement à proximité de la région d'Arous, elle est utilisée en faible quantité dans le mélange cru pour obtenir des effets particuliers pendant la cuisson.

- Minerai de fer :

Il provient d'une carrière se trouvant à 17 Km d'AZROU. Il intervient pour compenser le manque de Fe_2O_3 .

Toutes ces matières premières doivent être échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière.

Transport de la matière première :

Les matières premières sont transportées par des pelles mécaniques (chenille, camions) et des équipements de manutention. Les engins lors de phases d'extraction et d'alimentation du concasseur ainsi que pour le transport des ajouts, alors que les équipements de manutention (bandes, élévateurs) sont utilisés après l'opération de concassage pour transporter les différentes matières entre les installations des usines.

2- Concasseur :

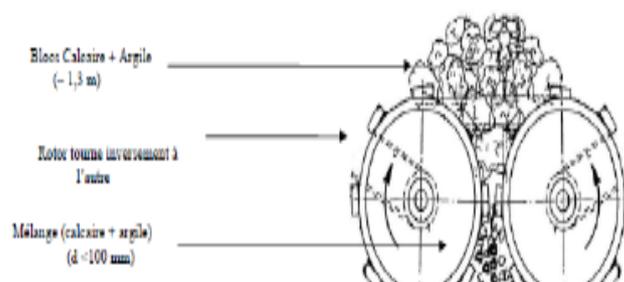


Fig 3 : Principe du concasseur à double rotor

C'est une opération destinée à la réduction des blocs de toutes les matières premières, afin de faciliter leur stockage et leur manutention. Elle se fait par un concasseur (Fig 3), constitué d'un carter blindé qui reforme deux rotors superposés tournant à grande vitesse qui comportent plusieurs marteaux qui frappent la matière à son entrée et la projettent dans

l'atelier de concassage pour être fragmentés et réduits à une taille de 80 mm répondant à des caractéristiques chimiques précises . Par ailleurs, une partie du calcaire concassé est expédié au centre de broyage et d'ensachage pour servir d'ajout au clinker et participe ainsi à la seconde unité de production.

Le concasseur a un débit de 1500t/h, peut concasser des blocs de dimensions maximales 1,3 m.

La sortie du concasseur est équipée d'un analyseur en ligne de type PGNAA afin de suivre la composition chimiques de chaque tas en temps réel et aussi pour mélanger automatiquement les matières premières extraites de la carrière pour préparer le pile de stockage.

Définition du PGNAA :

C'est une technique d'analyse élémentaire qui permet de mesurer la composition de l'ensemble des flux de matériaux utilisés dans le processus de fabrication du ciment avec une grande précision et avec une fréquence élevée (minute par minute),cette technique offre aux industriels l'opportunité d'améliorer la qualité de leurs produits tout en réduisant le couts .

3- Transport :

Les matières concassées sont transportées jusqu'à l'usine, le plus souvent par bande transporteuse.

4- Pré-homogénéisation :

La pré-homogénéisation 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 au niveau du laboratoire de l'usine .Les résultats de ces analyses permettent de définir les corrections nécessaires à apporter au mélange des matières premières ,(analysés et corrigé par le PGNAA et validé par le chimiste),ce mélange est dénommé le cru .

5- Broyage du cru :

L'entrée du broyeur cru est équipée d'un analyseur en ligne type PGNAA : pour contrôler la qualité du dosage des matières premières destinées au broyeur cru.

Le broyeur cru(Fig 4) 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.



Fig 4 : Broyeur du cru.

Le broyage du cru consiste à l'introduire dans le broyeur comportant deux parties de galets à suspension flottantes qui écrasent les matières contre une assiette rotative , ce qui permet de préparer la matière cru en farine .(Une poudre fine de dimension comprise entre 0 et 200 μ) .

◇ La composition chimique du cru :

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Mn ₂ O	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	F-
%	16-12	4-8	2-5	0-3	0-0,5	58-67	1-5	0-1	0,10,5	0-1,5	0,11-0,2

Tableau 4 : pourcentage des éléments chimiques 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).

$$\text{LSF} = \frac{\% \text{CaO} * 100}{2,8 \% \text{SiO}_2 + 1,18 \% \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \% \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

◇ *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.

$$\text{MS} = \frac{\% \text{SiO}_2}{\% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{\% S}{\% A + \% F} = 1,9 \text{ à } 3,2$$

◇ *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.

$$\text{MA} = \frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{\% A}{\% F} = 1,5 \text{ à } 2,5$$

6- Dépoussiérage :

La farine est emportée par le gaz chaud provenant du four vers le dépoussiéreur (Fig 5) à manches .Ce dernier retient les particules de farine (une teneur résiduelle de 50mg/m³) et laisse passer le gaz dépourvu de poussières par la cheminée .La farine retenue est ensuite récupérée et transportée vers le silo d'homogénéisation .Cette opération de dépoussiérage 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 et une meilleure protection de l'environnement.



Fig 5 : Dépoussiéreur

7- Homogénéisation :

A l'issue du broyage et après dépoussiérage, le cru a ensuite droit à une homogénéisation opérée dans de immenses silos dont la capacité de stockage est de 5000 t. Le remplissage de ce silo se fait à partir d'un pot de distribution fluidisé et de quatre aéroglisteurs. 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.

7- Le préchauffage :

La farine est introduite par un élévateur à godet en tête de la tour (Fig 6). Elle circule par gravité à contre courant avec les gaz chauds ascendants du four le long de la tour. L'échange thermique s'accompagne de :

- L'évaporation d'eau libre à 100 °c
- La décarbonatation partielle de la farine au niveau du cyclone : Le but de cette opération est d'optimiser l'énergie calorifique
- Décarbonatation des carbonates de calcium :



Fig 6 : Tour de préchauffage

8- Cuisson dans le four:

La farine provenant de la tour de préchauffage déjà décarbonatée à 60% environ, poursuit son parcours dans le four rotatif.

Le four rotatif (Fig 7) est un cylindre de 70 m de long et de 5,6m de diamètre revêtu à l'intérieur de briques réfractaires tournant de 1,2 à 5,6 tr/min, et également incliné 3% .Sa rotation et son inclinaison font progresser les matières et permettent d'acheminer progressivement les matières à cont courant des gaz chauds .A l'intérieur du four (Fig 8), le mélange est introduit dans la partie supérieure de la tour de préchauffage via des cyclones .Un bruleur et installé à la boîte à fumée assure la décarbonatation totale. Cette étape est dite calcination, elle permet ainsi de favoriser les réactions ultérieures de clinckerisation.



Fig 7 : Four rotatif

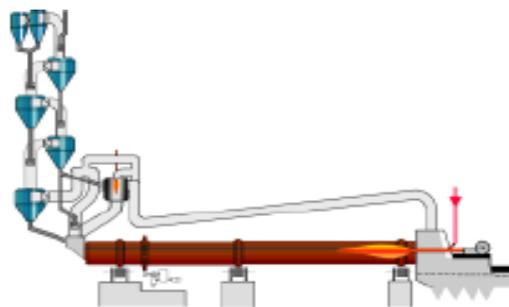


Fig 8 : Phase de cuisson

La matière se combine ensuite venant à la rencontre d'une chaleur, d'une flamme alimentée au fuel lourd et un combustible (petcoke) avec des pneus déchiquetés et des grignons d'olives, d'une température de 1450 °c provoquant la clinckerisation. Mais après l'utilisation de la fluorine, cette température diminue jusqu'à 1200°C.

La fluorine n'a pas seulement un intérêt économique mais elle améliore aussi la réactivité du clinker dans le ciment.

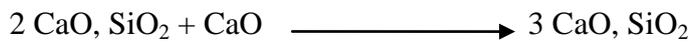
La matière qui sort du four est le clinker sous forme de grains gris foncés arrondis dont les dimensions sont irrégulières.

Dans le four trois phases sont à distinguer :

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



Phase transitoire ou phase liquide : caractérisée par la formation des combinaisons provisoires (900-1300°)



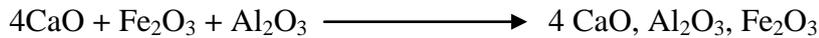
C_3S (Alite 50-70%) à 1220°C



C_2S Bélite (10-30%) à 1220°C



C_3A Céliste (2-15%) à 1440°C



C_4AF Féliste (5-15%) à 1450°C

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

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

◇ Rôle des composants du clinker dans le ciment :

Minéraux	Formule chimique	Symbole	Rôle
Silicates tricalcique	$3\text{CaO}, \text{SiO}_2$	C_3S	Résistance initiale
Silicates bi calcique	$2\text{CaO}, \text{SiO}_2$	C_2S	Résistance long terme
Aluminates tricalcique	$3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	Prise rapide
Alumino-ferrite Tetracalcique	$4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	Sans effet sur la résistance du ciment

Tableau 5 : Rôle des composants du clinker dans le ciment.

9- Refroidissement :

Une fois que le clinker est sorti du four, il passe à un refroidisseur (Fig 9) à grille qui permet d'assurer la trempe des nodules brulants à l'aide de 12 ventilateurs qui propulsent de l'air tiré de l'atmosphère. Ce refroidissement alimentera aussi le four en oxygène pour abaisser la température et le ramener à 100 °C ce qui facilite la manutention et le stockage. Le clinker est ensuite transféré vers le silo de stockage.



Fig 9 : Refroidisseur

Le rôle des refroidissements consiste à garantir la trempe du clinker pour avoir une structure minéralogique et des dimensions de cristaux favorables.

Donc le refroidissement permet :

- La décomposition de C_3S en C_2S et la formation de la chaux libre qui va diminuer la densité du clinker, ce qui influe sur la qualité de clinker en matière de sa composition.
- De récupérer une partie de l'énergie thermique et l'utiliser pour le préchauffage des combustibles de substitution.
- De faciliter la manutention et le stockage du clinker.

11-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.

Le clinker et les ajouts, qui sont des matériaux grossiers par rapport à la granulométrie du ciment, sont introduits en niveau du broyeur (Fig10) 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 de ciment, l'usine LafargeHolcim REM utilise un broyeur (BK4)



Fig 10 : Broyage du clinker avec 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.



Fig 11 : Expédition du ciment

III-techniques d'analyse et contrôle de qualité :

Le laboratoire a pour but le contrôle de 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 différentes analyses réalisées au laboratoire sont comme suivies :

- Un contrôle du cru sorti broyeur chaque heure.
- Un contrôle de clinker chaque 2 heures.
- Un contrôle de ciment chaque 2 heures.
- Un contrôle de la farine chaude 3 fois/jour.

- Un contrôle de combustible 3 fois /jour.
- Un contrôle des matières premières 1 fois/semaine.

1-Essais chimiques :

1.1-La perte eu 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 20min.



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

Fig 12 : Four à moufle

m1 : Masse du creuset en (g).

m2 : Prise d'essai en (g).

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

1.2-détermination de la teneur en fluorine :



Fig 13 : Potentiomètre

Pour déterminer la teneur en fluorine dans un échantillon (cru, ciment et clinker), on utilise un potentiomètre, après la solubilisation de l'échantillon.

1.3-détermination de la teneur en chlorure :



Fig 14 : Titreur des ions de 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 :

$$\text{AgNO}_3 + \text{Cl}^- \rightarrow \text{AgCl} + \text{NO}_3^-$$

1.4-La finesse :



Fig 15 : Tamiseur

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.

1.5- Analyse par spectrométrie de fluorescence-X :

C'est une technologie moderne qui facilite la tâche d'exploitation de plusieurs résultats. Le principe de cette analyse consiste à surbroyer l'échantillon à analyser dans un surbroyeur pour avoir des granulats de dimension plus fin. Par suite on met 15 g dans un pressoir hydraulique pour former ainsi une pastille qu'on va la mettre en contact avec les rayons X dans un analyseur par fluorescence. Les résultats sont traités automatiquement par l'ordinateur qui nous affiche le pourcentage en chaque constituant.

1 : L'échantillon à analyser est introduit dans le bol en carbure et on met deux gouttes de **triéthanolamine** pour éviter le colmatage de la matière dans le bol et faciliter le compactage de la pastille.

2 : Ensuite l'assiette est introduite dans le surbroyeur pendant 3 min pour obtenir des particules très fines.

3 : La figure représente le moule de la pastille.



Fig 16 : Préparation et analyse des échantillons dans le spectromètre.

4 : Après broyage, l'échantillon est introduit dans un moule en acier chromé et le produit à analyser dans une presse à pastiller.

5 : Récupération de la pastille.

6 : Analyse de la pastille par le spectromètre à fluorescence X, les résultats sont affichés dans un ordinateur lié à l'analyseur.

2-Essais physique et mécanique :

2.1-La 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 déterminer le temps au bout duquel le ciment commence à durcir. On distingue 2 phases : Prise Initiale et Finale.

Fig 17 : Appareillage d'essai à aiguille de Vicat

2.2-Essai d'expansion :



Fig 18 : aiguille de Lechatelier



Fig 19 : Bouillard Lechatelier

Les essais d'expansion sont exécutés au moyen du module de Lechatelier permettant la mesure de la déformation de l'échantillon .Ces essais permettent d'assurer que le ciment ne contient pas de substances susceptibles de provoquer une expansion dangereuse au cours du temps tels que la chaux libre .La réaction d'hydratation est accélérée par un traitement de la pate afin de constater l'expansion éventuelle du ciment dans un délai très court. Les aiguilles(Fig 18) de Lechatelier sont utilisées pour mesurer l'expansion, la différence d'ouverture des aiguilles avant et après cuisson (Fig 19) doit rester inférieure à 10 mm.

2.3-Essai de consistance :



Fig 20 : Appareil de Vicat

Cet essai nous permet de déterminer la quantité d'eau qu'on doit ajouter au ciment, la pate est introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs. On enlève l'excès de pate par un mouvement de va-et vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieur du moule, l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat (Fig 20).

La pate a une consistance normale, si $d = 6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$:

- ◇ Si $d > 7$: Il n'y a pas assez d'eau.
- ◇ Si $d < 5$: Il y a trop d'eau.

3-Essais mécaniques : Résistance à la flexion et à la compression :



Fig 21 : Malaxeur

- Peser directement 225 g de l'eau dans un bol du malaxeur séché et nettoyé convenablement.
- Peser 450 g de ciment et le verser dans le bol de malaxeur.
- Mettre le malaxeur en marche en mode automatique.
- Après 30 s, verser en haut du bol 1350 g de sable normalisé.
- Après l'arrêt automatique du malaxeur, racler les parois et le fond du bol sur une plaque inoxydable puis former une patte rectangulaire



Fig 22 : Bol des moules



Fig 23 : Table à choc



Fig 24 : Moules de ciment

● Fixer le moule sur la table à choc, introduire une partie du mélange puis faire démarrer la machine à 60 choc/min. Après l'arrêt automatique de la machine, verser le deuxième contenu sur le premier puis racler par une raclette. Mettre une deuxième fois la machine à choc en marche. Une fois la machine est arrêtée, on fait raser les moules à l'aide d'une règle métallique et on les conserve dans une chambre humide pendant 24 h.



Fig 25 : Appareil de résistance

● Après 24 h, on fait sortir les moules de l'armoire et on les démoule puis on remet les éprouvettes dans l'armoire pour les essais de flexion et de compression à 2 jours, 7 jours, 28 jours.

- **Flexion** : La flexion permet de déterminer la contrainte de traction par flexion. La rupture est effectuée à l'aide d'un appareil à presse muni d'un dispositif qui casse l'éprouvette en affichant la pression supportée en Méga Pascal.

- **Compression** : Chaque demi éprouvette passe en compression sur faces latérales, entre deux plaques de métal dur. Enfin, l'appareil à presse indique la pression limite à laquelle l'éprouvette a résisté.

Chapitre III : L'optimisation du gypse dans le ciment

I- Introduction :

En 1870, il arrive de voir que le ciment prenne si rapidement qu'on n'arrivait pas à le mettre en place. Pour retarder la prise du ciment, on a eu l'ingénieuse idée d'introduire du gypse. En effet, l'ajout de 1 à 4 % de gypse à un ciment à prise rapide pouvait retarder sa prise quelques minutes à plusieurs heures.

Le gypse joue un rôle primordial dans le processus de durcissement et sur la résistance du ciment.

Une étude effectuée sur l'influence du gypse sur les différentes caractéristiques du ciment nous a permis de déterminer le pourcentage idéale de cet ajout dans le ciment.

II- L'optimisation du SO₃ dans le ciment :

1-Définition du gypse :

Le gypse est une roche sédimentaire évaporitique. Il se forme au niveau de lagunes et parfois des lacs salés. Dans les deux cas, de l'eau salée se retrouve piégée temporairement sans alimentation en eau douce, l'eau va alors s'évaporer rapidement. Ceci entraîne le dépôt des sels (Ca²⁺, sulfates) qui étaient dissous dans l'eau.

2- Caractéristiques du ciment portland :

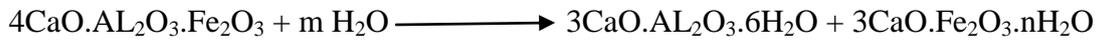
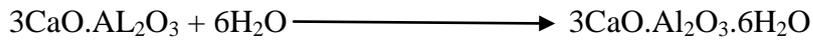
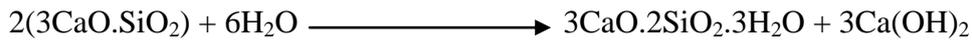
2.1- Hydratation du ciment :

La prise du ciment n'est pas un séchage de la pâte après ajout de l'eau ; il s'agit d'un ensemble de réactions chimiques d'hydratation permettant le passage de la pâte de ciment (ciment additionné d'eau) de l'état liquide à l'état solide.

La pâte de ciment hydraté est le résultat de réactions chimiques entre l'eau et les composés du ciment. Il s'agit d'un processus complexe 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.

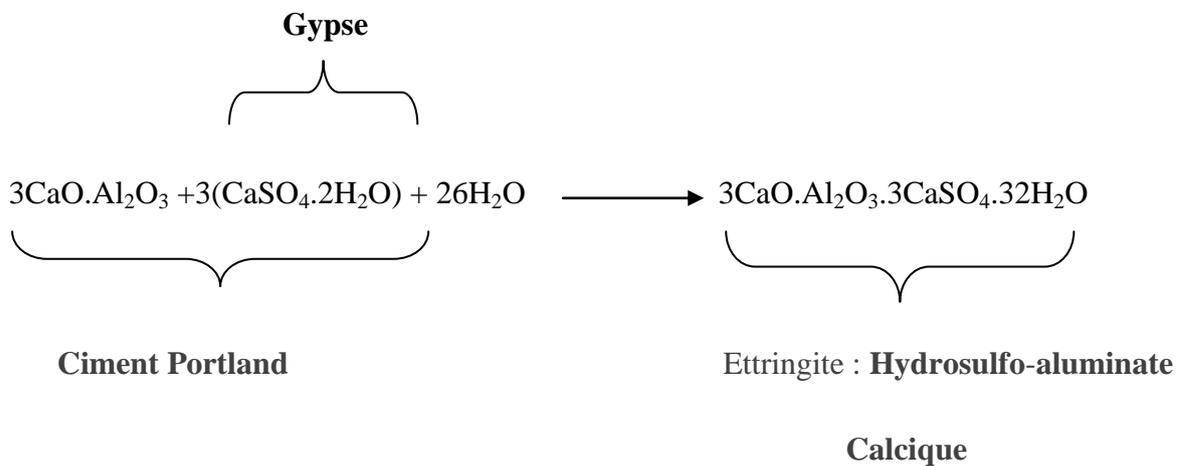
L'étude des réactions d'hydratation des composants du ciment dissocie artificiellement des mécanismes dont le déroulement est, dans les faits, simultané.

Les réactions principales de l'hydratation du ciment sont :



◇ **CSH** ($3 \text{CaO}.\text{SiO}_2.3\text{H}_2\text{O}$) ou le tobermolite n'est pas un composé stœchiométrique et cristallin, mais a les caractéristiques d'un gel dont l'enchevêtrement du gel donne la dureté au ciment.

◇ **Formation de l'ettringite** ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{CaSO}_4.32\text{H}_2\text{O}$) :



2.2-Cinétique et chaleur d'hydratation :

Les matériaux du ciment présentent des vitesses d'hydratation différentes. C3A et C3S s'hydratent plus vite que C4AF et C2S, la réaction d'hydratation du ciment portland est exothermique, la quantité de chaleur dégagée par hydratation d'une gramme de ciment portland à 28 jours est de 400-500 joules qui répartissent de la matière suivante, entre les silicates et les aluminates, étudiés séparément.

2.3- La prise :

C'est l'épaississement et la perte de mobilité de la pâte du ciment. Une de plus importantes propriétés techniques de ciment est sa rapidité de prise. La confection des éléments devient difficile (début de prise) ou impossible (fin de prise). Les délais de prise devront être correspondants au temps de confection des éléments. Généralement, le gypse est utilisé en quantité de 3 à 6 % de régulateur de prise.

Début de prise :

On observe après une heure une augmentation brusque de la viscosité accompagnée d'un dégagement de chaleur.

Fin de prise :

La fin de prise correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide. Le temps de fin de prise est déterminé à l'instant où l'aiguille de Vicat ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment.

Le CPJ 45 à un temps de prise supérieur à 1H30 à $T = 20^{\circ}\text{C}$.

2.4- L'eau de gâchage :

C'est la quantité d'eau nécessaire pour réaliser le processus d'hydratation du ciment. Un excès d'eau dans l'opération du malaxage du béton peut provoquer des conséquences négatives sur la résistance et le retrait du béton.

3- L'influence du gypse sur le ciment :

Le clinker étant le composé principal du ciment, il présente le caractère de durcissement instantané après hydratation. Et ceci provoque une mauvaise maniabilité du béton. Alors il est nécessaire d'ajouter un retardateur pour régulariser la prise c'est le gypse. A noter qu'un excès de gypse provoque un retardement exagéré de la prise. Donc le béton prend un temps plus que le temps normal pour durcir.

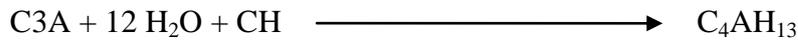
Le gypse intervient lors de l'hydratation par son élément majeur le $(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ pour former l'ettringite qui va former une barrière sur le C_3A .

Le temps pour que C_3A se libère de cette membrane est considéré comme le temps de la prise.

Si la réaction d'hydratation de C_3A se déroule sans l'ajout du gypse $(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ on aura formation des composés qui ont un fort effet négatif sur les propriétés rhéologiques de la pâte.

❖ **Réaction d'hydratation sans gypse :**

Réaction violente avec fort flux de chaleur.



❖ **Réaction d'hydratation avec gypse :**



III- Procédé expérimental :

1- Procédé d'essai :

◇ **But :**

L'optimisation du gypse dans le ciment : Cas CPJ 45

◇ **Principe :**

L'essai consiste à effectuer des prélèvements du ciment CPJ 45 en variant le pourcentage du gypse.

On a fait cinq prélèvements pour chaque pourcentage de gypse variés. Sur tous les échantillons prélevés; on a pratiqué des analyses et des essais physico-chimiques afin de tracer les courbes de l'évolution de la résistance et de la prise en fonction de la variation de SO₃ (l'élément majeur du gypse), ces courbes permettent de déterminer le pourcentage optimal du gypse pour les deux paramètres.

◇ **Mode opératoire :**

- On a varié dans la salle de contrôle du ciment portland la teneur de gypse en allant de 3 à 10 %, ensuite on est allé au broyeur de CPJ 45 pour effectuer cinq prélèvements chaque 20 minutes afin d'avoir plusieurs échantillons qui représentent les différents pourcentages de gypse dans cette intervalle.

- On a effectué des analyses par fluorescence de RX sur les différents échantillons.
- On a prélevé 500 g pour chaque prélèvement puis on a les bien mélangé afin d'effectuer la moyenne.

- Cet moyenne a subit des tests de prise et de résistance.

2- Résultats expérimentales :

2.1- Analyses du spectromètre à RX, finesse et perte au feu :

- Pour un pourcentage de 3% de gypse :

	Finesse 45 μ	Finesse 90 μ	PAF	% SO ₃
P 1	7,75	0,21	16,48	2,70
P 2	7,10	0,17	15,90	2,22
P 3	7,62	0,15	15,99	2,28
P 4	7,21	0,23	16,34	2,35
P 5	7,33	0,20	16,22	2,36

Tableau 6 : Analyses chimiques de CPJ 45 avec 3 % de gypse.

- Pour un pourcentage de 4 % de gypse :

	Finesse 45 μ	Finesse 90 μ	PAF	% SO ₃
P1	7,2	0,15	15,05	2,80
P2	6,27	0,05	14,69	2,84
P3	6,53	0,08	14,80	2,85
P4	7,05	0,09	14,98	2,93
P5	6,95	0,13	14,83	2,93

Tableau 7 : Analyses chimiques de CPJ 45 avec 4% de gypse.

- Pour un pourcentage de 6 % de gypse :

	Finesse 45 μ	Finesse 90 μ	PAF	% SO ₃
P1	7,13	0,24	15,81	3,05
P2	6,91	0,18	15,61	3,07
P3	7,03	0,22	15,73	3,08
P4	7,94	0,17	15,66	3,12
P5	7,99	0,19	15,64	3,13

Tableau 8 : Analyses chimiques de CPJ 45 avec 6% de gypse.

- Pour un pourcentage de 8% de gypse :

	Finesse 45 μ	Finesse 90 μ	PAF	% SO ₃
P1	7,02	0,15	16,51	3,26
P2	6,27	0,05	16,06	3,30
P3	6,53	0,08	16,68	3,41
P4	7,05	0,09	15,98	3,43
P5	6,95	0,13	16,38	3,58

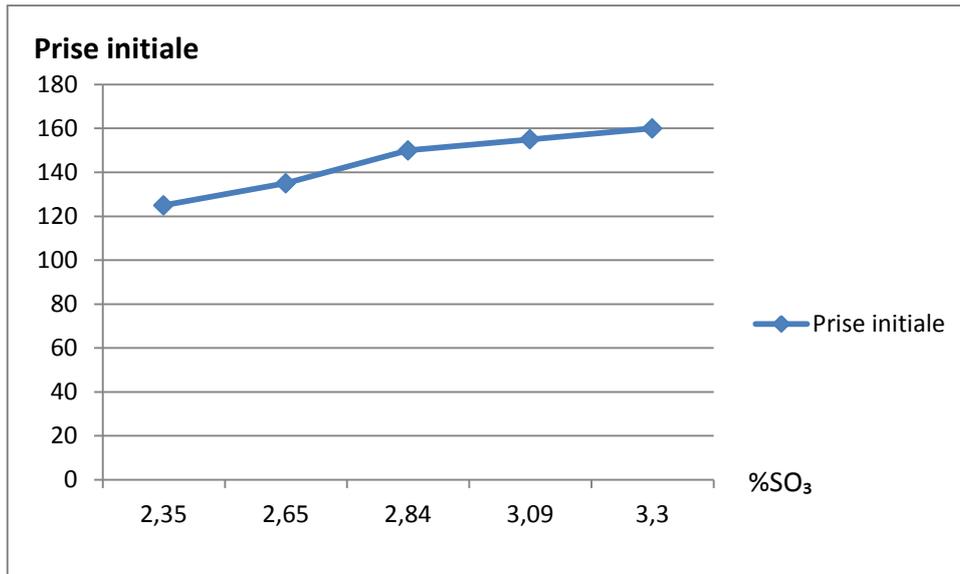
Tableau 9 : Analyses chimiques de CPJ 45 avec 8 % de gypse.

2.2- Analyses de prise initiale, finale et de résistance :

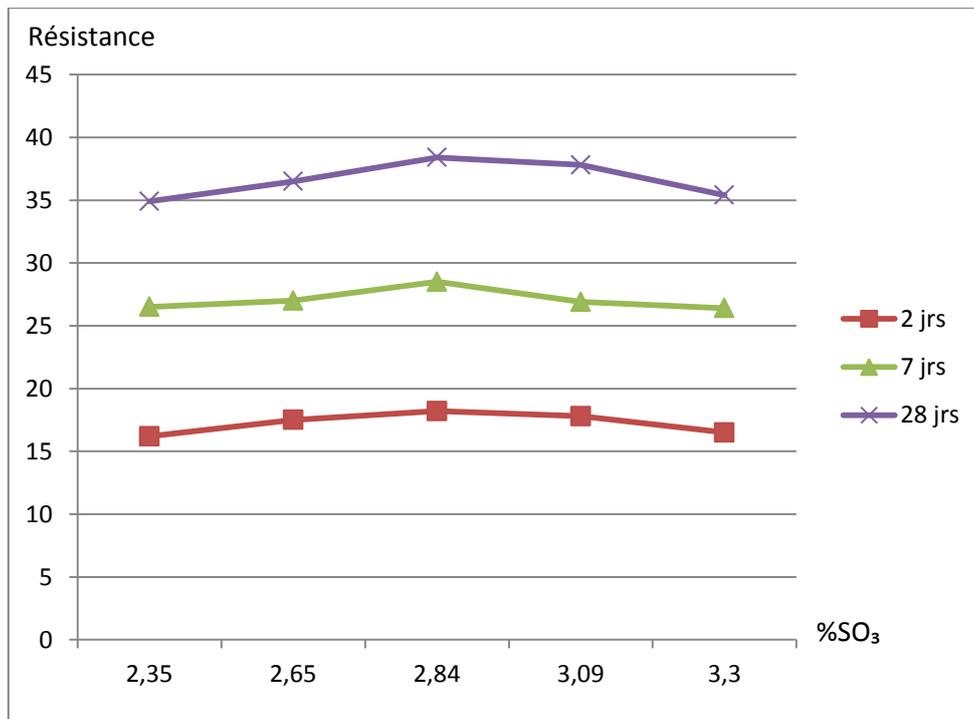
La dernière étape consiste à soumettre les moyennes à l'essai de prise ainsi que test de compression et flexion. Les résultats obtenus seront exploités afin de tracer des courbes qui représentent la teneur de SO₃ en fonction de la prise et la résistance de CPJ 45 étudiés dont le but ultime de déterminer l'intervalle optimale de la teneur de gypse dans ce ciment en question.

Echantillons	%SO ₃	EG	Prise initiale	Prise finale	Résistance(MPa)		
					2 jrs	7 jrs	28 jrs
M1: 3%de gypse	2,35	28,4	125	230	16,2	26,5	34,9
M2: 4%de gypse	2,65	28	135	240	17,5	27	36,5
M3 : 5% de gypse	2,84	27,8	150	255	18,2	28,5	38,4
M4: 6%de gypse	3,09	27,5	155	265	17,8	26,9	37,8
M5: 8%de gypse	3,30	27,2	160	270	16,5	26,4	35,4

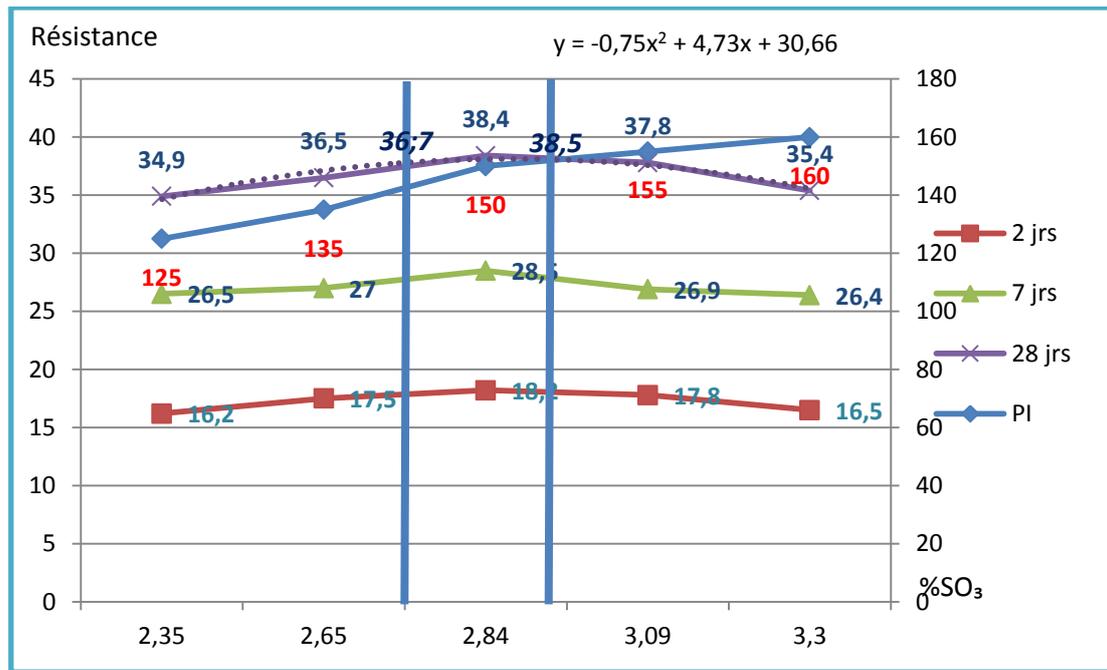
Tableau 10 : Analyses chimiques des moyennes.



Graphe 1 : prise initiale (PI) en fonction de % SO₃.



Graphe 2 : La résistance en fonction de % SO₃.



Graph 3 : La résistance et la prise initiale en fonction de % SO₃.

Les normes exigent que la prise soit supérieure de 90 min et ne dépasse pas les 3 heures. On travaille à LafargeHolcim REM avec des consignes qui obligent une prise initiale de ciment variant entre 130 et 160 min, une teneur de SO₃ ne présente aucun risque, allant de 2,7 jusqu'à 2,9 pour des valeurs de résistances comprises entre 36,7 et 38,5.

◇ *Si la teneur en SO₃ est inférieure à 2,7, ceci indique qu'on a une tendance à avoir une prise rapide, ce qui implique l'obtention d'un béton difficilement manipulable et une baisse de résistance.*

◇ *Si la teneur en SO₃ est supérieure à 2,9, on aura une prise lente, ce qui implique un durcissement fortement ralenti avec des baisses de résistances.*

Remarque :

L'optimisation du gypse ne se fait qu' :

- Un changement des ajouts (calcaire, gypse, clinker)
- Un changement dans la finesse.

Conclusion :

Sous la pression du client, la qualité n'est pas un choix pour la convection collective des différents partenaires de l'urgence de la qualité en tant que composante essentielle de la stratégie commercial.

L'objectif de ce travail est d'évaluer expérimentalement l'influence du taux du gypse sur les propriétés rhéologiques du ciment et son comportement mécanique.

Le gypse est un régulateur de prise, mais son taux d'incorporation doit être déterminé afin d'optimiser les résistances à 28 jours. Pour cela nous avons modifié le pourcentage du gypse.

En conclusion, nous avons au cours de cette étude déterminé le palier optimal en SO_3 dans le CPJ 45.

Ce stage m'a permis de connaître le procédé de fabrication, participer aux analyses et contrôle de qualité de ciment et découvrir les divers aspects d'un problème et d'envisager les solutions adéquates.