

Liste des Abréviations

CIMA : Cimenterie Maghrébine.

ODI : Organisation du développement industriel.

CIOR : Cimenterie de l'Orientale.

CPJ : ciment Portland avec ajout.

EPI : équipement de protection individuel.

PAF : perte au feu.

RX : Rayon X.

SSB : Surface Spécifique BLAINE.

P.I : Prise Initiale.

P.F : Prise Finale.

CK : Clinker.

C₃A : $(\text{CaO})_3 \text{Al}_2\text{O}_3$.

Liste des Figures

Figure 1: Les types de ciment	5
Figure 2 : Schéma simplifié du procédé industriel de production du ciment	5
Figure 3: carrière calcaire	6
Figure 4: Schéma simplifié du doseur	7
Figure 5: Broyeur du cru	8
Figure 6: Tour de préchauffage	9
Figure 7: four rotatif	9
Figure 8: Grains de clinker sortant du four.....	10
Figure 9: Broyeur ciment	11
Figure 10: a) Livraison en sac / b) Livraison en vrac	12
Figure 11: les EPIs	13
Figure 12: Four T=1000°C	14
Figure 13: Balance analytique / Tamis / Tamiseur	15
Figure 14: Rayon X.....	16
Figure 15: aciette/ surbroyeur/ presse pastille/ pastille	17
Figure 16: Appareil de mesure SSB.....	18
Figure 17 : moule tronconique/ appareil de Vicat	19
Figure 18:prismètre	19
Figure 19: aiguille de le Chatelier/ bouillard	20
Figure 20 : malaxeur/ table à choc/ moules.....	21
Figure 21 : éprouvettes/ chambre humide	21
Figure 22: Appareil flexion et compression.....	21
Figure 23 : Prise de prélèvement.....	24
Figure 24: résultats des analyses chimiques du ciment en fonction de la variation du taux de gypse	26
Figure 25: Courbe de l'évolution de la prise initiale (en min) en fonction du pourcentage en SO ₃	28
Figure 26: Schéma simplifié illustrant la prise après contact du ciment avec l'ajout du gypse et de l'eau	28
Figure 27:Résultats de la compression de 28 jours en fonction du % en SO ₃	29
Figure 28: Résistances à la compression à 2j, 7j et 28j et le temps de prise du ciment en fonction du %SO ₃ ..	30

Listedes Tableaux

Tableau 1: Compositions chimiques de la matière première utilisée	25
Tableau 2: Tableau des résultats des analyses chimiques du ciment en fonction de la variation du taux de gypse.....	26
Tableau 3: Tableau des résultats des essais physiques en fonction de la variation du gypse et de SO ₃	27
Tableau 4: Résultats des résistances en fonction du % en SO ₃	29

Table de matières

Introduction.....	1
Chapitre 1 : Présentation de l'entreprise et analyse du processus de fabrication du Ciment.....	2
Section 1 : Présentation de l'entreprise	2
1. Présentation HOLCIM	2
2. Présentation LAFARGE.....	3
3. Fusion LAFARGE-HOLCIM	4
Section 2 : Procédé de fabrication du ciment	4
1. Définition du ciment.....	4
2. Procédé industriel.....	5
a. Extraction.....	6
b. Concassage et pré-homogénéisation des matières premières	7
c. Broyage et homogénéisation de la farine crue :	8
d. Production du clinker	8
e. Broyage du ciment.....	11
f. Ensachage et expédition.....	11
3. Les voies de fabrication du ciment.....	12
Chapitre 2 : Service contrôle qualité	13
Section 1 : Essais chimiques	13
1. Perte au feu(PAF).....	13
2. Finesse	15
3. Analyse par fluorescence RX	15
4. Le taux d'humidité.....	17
Section 2 : Essais physiques.....	17
1. La surface spécifique BLAINE.....	17
2. La prise.....	18
3. L'expansion	19
4. La résistance	20

Partie expérimentale	22
.....	22
Chapitre 3 : Optimisation du gypse	23
1. Expérience	23
2. Essai chimique sur la Matière première	25
3. Exploitation des résultats	26
a. Les résultats des essais chimiques.....	26
b. Les résultats des essais physiques.....	27
c. Les résultats des essais mécaniques.....	29
4. Représentation combinée des résultats.....	30
Conclusion	31

Sommaire

Introduction.....	1
Chapitre 1 : Présentation de l'entreprise et analyse du processus de fabrication du Ciment.....	2
Section 1 : Présentation de l'entreprise	2
Section 2 : Procédé de fabrication du ciment	4
Chapitre 2 : Service contrôle qualité	13
Section 1 : Essais chimiques	13
Section 2 : Essais physiques.....	17
Partie expérimentale	22
.....	22
Chapitre 3 : Optimisation du gypse	23
Conclusion	31

Introduction

Le ciment demeure le matériel de base de chaque industrie. Durant ces dernières années, le Maroc a vécu un développement industriel important. Suite à ce développement, notre territoire national est devenu le siège de nombreux investissements industriels, plusieurs infrastructures ont vu le jour, des projets ont été inaugurés alors que d'autres sont en cours de réalisation, d'où la forte demande en ciment.

En effet, l'industrie cimentière est devenue l'une des activités industrielles la mieux structurée et la mieux répartie sur le royaume. Elle réalise, en moyenne, 46% de la production et 50% de la valeur ajoutée du secteur des matériaux de constructions.

La fabrication du ciment est un procédé complexe qui exige aussi bien un savoir-faire, qu'une bonne maîtrise des différents outils et techniques qui entrent dans sa production et les contrôles rigoureux et continus de sa qualité.

De ce fait, le laboratoire de contrôle de qualité joue un rôle non seulement primordial mais indispensable dans l'industrie cimentière vue qu'il assure le maintien et le contrôle de la conformité du produit aux normes tout en tenant compte de l'hétérogénéité des matières premières qui sont : le calcaire, le gypse et le clinker.

Dans ce cadre, notre étude portera sur l'évaluation expérimentale de l'influence du taux de gypse sur les propriétés physico-chimiques du ciment : sa résistance à la compression et la flexion mécaniques, ainsi que le temps de prise. Et puis la recherche d'une valeur d'ajout optimum du gypse au clinker afin d'obtenir un ciment avec une meilleure résistance et un temps de prise conforme à la norme.

Pour cela, notre mémoire de stage sera réparti en 3 grandes parties :

1. Présentation de l'entreprise et analyse du processus de fabrication du ciment
2. Service contrôle qualité
3. Optimisation du gypse

Chapitre 1 : Présentation de l'entreprise et analyse du processus de fabrication du Ciment

Section 1 : Présentation de l'entreprise

1. Présentation HOLCIM



HOLCIM est l'un des plus grands producteurs mondiaux de ciment, son siège central se trouve à Zurich. Elle se répartit dans différents continents partant de l'Europe vers l'Amérique et puis l'Asie.

HOLCIM Maroc, leader mondial dans la production de ciment. Il fut connu au début sous le nom de CIMA. Cette dernière est née d'une convention Algéro-marocaine en septembre 1972. Suite au conflit entre le Maroc et l'Algérie, cette dernière s'est retirée et le Maroc fut donc obligé de combler la part investie par l'Algérie.

L'ODI a créé une nouvelle société dénommée CIOR qui a ainsi donc repris les actifs de CIMA.

Vu la forte demande en ciment, la création d'une cimenterie complète s'est avérée nécessaire, la première usine a été implantée à RAS EL MA. Le choix du lieu n'a pas été aléatoire, il a tenu compte certaines raisons :

- La disponibilité de la matière première en quantité et en qualité (l'usine a été implantée à proximité d'une carrière de calcaire).
- La possibilité d'alimentation en eau (deux forages ont été réalisés près de l'usine).

- La possibilité d'alimentation en énergie.
- La qualité des terrains.

Ensuite, CIOR a subi une privatisation de la part d'un groupe Suisse intitulé HOLDERBANK qui s'est emparé de plus de 50% des actionnaires alors que le reste des actifs appartient à l'état marocain. Cette dernière est renommé HOLCIM.

N.B :

HOL : rappelle les origines du groupe « HOLDERBANK village ».

CIM : symbolise l'activité du groupe « Ciment ».

◆ **Historique**

- **1972** : construction de CIMA par le gouvernement marocain et l'Algérie qui se situe à LAÂYOON région d'Oujda.
- **1974** : Conflit entre Maroc et l'Algérie.
- **1976** : création de CIOR par l'ODI.
- **1989** : installation d'un centre d'ensachage et de broyage à DEKKARAT, Fès.
- **1992** : privatisation de CIOR par un groupe suisse « Holderbank ».
- **2002** : changement de l'identité CIOR devient HOLCIM Maroc.
- **2009** : dédoublement de la capacité de production allant de 1400t/jr à 2800t/jr a l'usine de FES.
- **2016** : date réalisation de la fusion LAFARGE-HOLCIM.

2. Présentation LAFARGE

LAFARGE est un groupe français et leader mondial dans le secteur des matériaux de construction. Elle produit principalement le ciment, les granulats, le plâtre, la chaux et le béton prêt à l'emploi. Le groupe LAFARGE a même développé des ciments spéciaux et des bétons innovants obtenant ainsi une bonne réputation à l'échelle internationale.

LAFARGE est présent dans 61 pays, il emploie environ 63000 personnes réparties sur 161 sites de production.

LAFARGE MAROC est une filiale du groupe avec une part de marché de plus de 40%. Cette filiale emploie une méthode stratégique qui repose sur la diversification des produits dans lesquels elle investit afin de répondre au besoin du marché Marocain.

3. Fusion LAFARGE-HOLCIM

En 2016, les deux groupes LAFARGE et HOLCIM, avec le même objectif de développer les produits et solutions constructives durables afin d'accompagner le développement du secteur de bâtiment et d'infrastructure, ce sont fusionnés pour donner naissance au groupe LAFARGE-HOLCIM. Cette fusion a permis de rassembler la part de HOLCIM et celle de Lafarge pour préoccuper une part de marché de 54.9% plus importante que précédemment. D'un autre côté, la construction est devenue plus vite et plus durable tout en respectant les exigences des normes internationales et nationales en matière première et l'économie d'énergie.

Section 2 : Procédé de fabrication du ciment

1. Définition du ciment

Le ciment est un liant hydraulique utilisé dans différents domaines, principalement comme matériau de construction. Il est produit à travers un procédé précis et complexe.

Le ciment est fabriqué à la base d'un produit semi-fini, le clinker, de plus des ajouts tel que le calcaire, le gypse, la pouzzolane et les cendres volants dans le cas de la cimenterie de FES. Le pourcentage de ces ajouts différents selon la classe de ciment fabriqué.

Ils existent plusieurs types de ciments suivant la demande du marché ainsi que leur mode d'emploi.

Ils diffèrent entre eux par leurs résistances et leurs ajouts. Ces types de ciment sont :

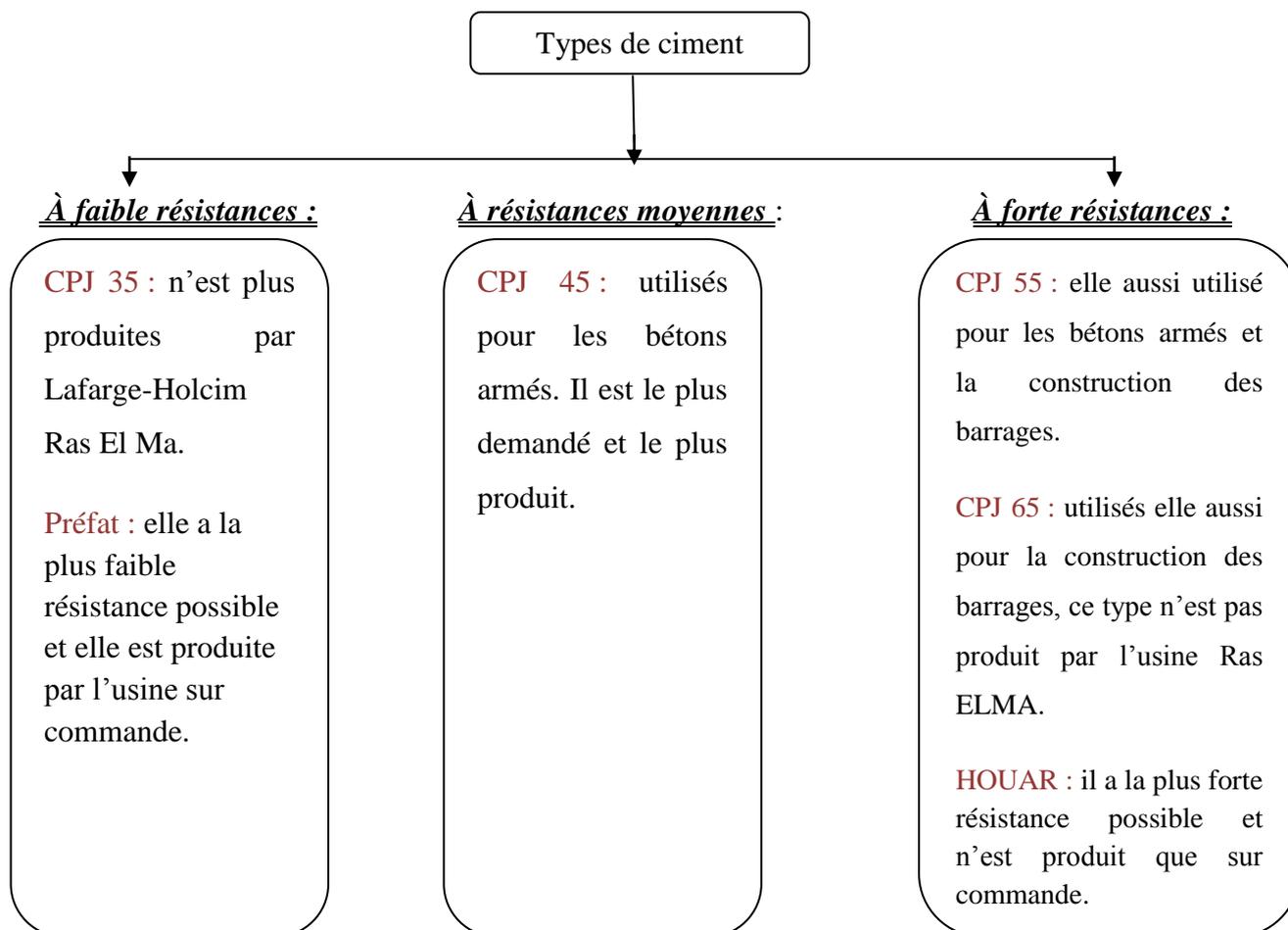


Figure 1: Les types de ciment

2. Procédé industriel

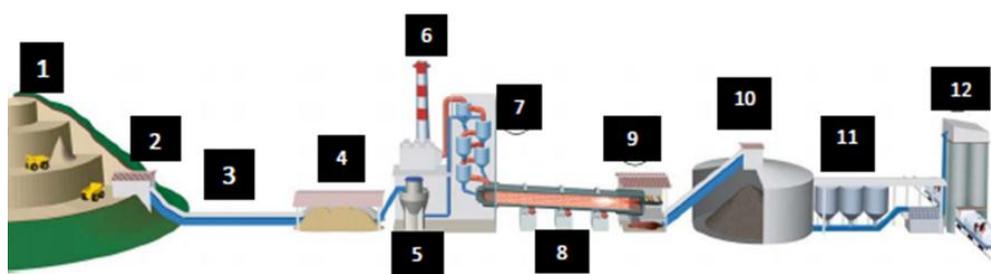


Figure 2 : Schéma simplifié du procédé industriel de production du ciment

Légende :

- | | | | |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| 1 : carrière. | 2 : hall de stockage du mixte. | 3 : convoyeur. | 4 : Doseur. |
| 5 : Broyeur du cru. | 6 : cheminée. | 7 : Toure à 5 cyclones. | 8 : Four rotatif. |
| 9 : refroidisseur. | 10 : Sillon de stockage du clinker. | 11 : Broyeur à ciment. | 12 : Sillon de stockage du ciment. |

La production du ciment s'effectue en 6 étapes sous un contrôle rigoureux à travers des analyses effectuées sur des prises d'échantillon dans chacune des étapes. Ces étapes sont :

- Extraction des matières premières.
- Concassage et pré-homogénéisation des matières premières.
- Broyage et homogénéisation de la farine crue.
- Production du clinker.
- Broyage du ciment.
- Ensachage et expédition du ciment.

a. Extraction

Le ciment est fabriqué de quatre composants chimiques essentiels : les carbonates de calcium CaCO_3 , l'alumine Al_2O_3 , la silice SiO_2 et l'oxyde de fer Fe_2O_3 que l'on extrait respectivement du calcaire, schiste, sable et le minerai de Fer.

Comme indiqué avant, l'usine LAFARGE-HOLCIM Fès n'est pas située aléatoirement à RAS EL MA, mais plutôt c'est à cause de la richesse de cette région en calcaire et la proximité schiste. Quant aux sables et le minerai de fer, ils sont livrés par des fournisseurs sous des normes exigées par l'usine elle-même selon le besoin.

○ **Carrière de calcaire**



Figure 3: carrière calcaire

L'extraction du calcaire se réalise par abatage à l'explosif dans des cutines (trou) de 12m de profondeur. Cette technique permet de fragmenter d'importants volumes de roche pour la récupération et le traitement du matériel.

○ Carrière de schiste

Le schiste nous est importé d'une carrière dans les régions de Séfrou appartenant à l'usine, il est stocké près du concasseur.

b. Concassage et pré-homogénéisation des matières premières

○ Concassage

L'atelier de concassage est situé près de la carrière. Le concassage a pour but d'optimiser et faciliter le stockage. Le concasseur utilisé par l'usine LAFARGE-HOLCIM RAS EL MA est un concasseur à marteaux (36 marteaux) et à double routeur.

○ Pré-homogénéisation

Les matières concassées sont récupérées par un stacker qui permet la formation du mixte : un mélange proportionnel de 90% de calcaire et 10% du schiste, et son stockage sous forme de couches successives.

C'est à ce niveau-là que le service contrôle qualité définit combien il faut ajouter des matières de correction au mélange : schiste, minerai de fer et sable.

○ Dosage

Cette correction s'effectue au niveau du doseur afin d'obtenir le cru pour la fabrication du clinker qui est le composant majeur du ciment.

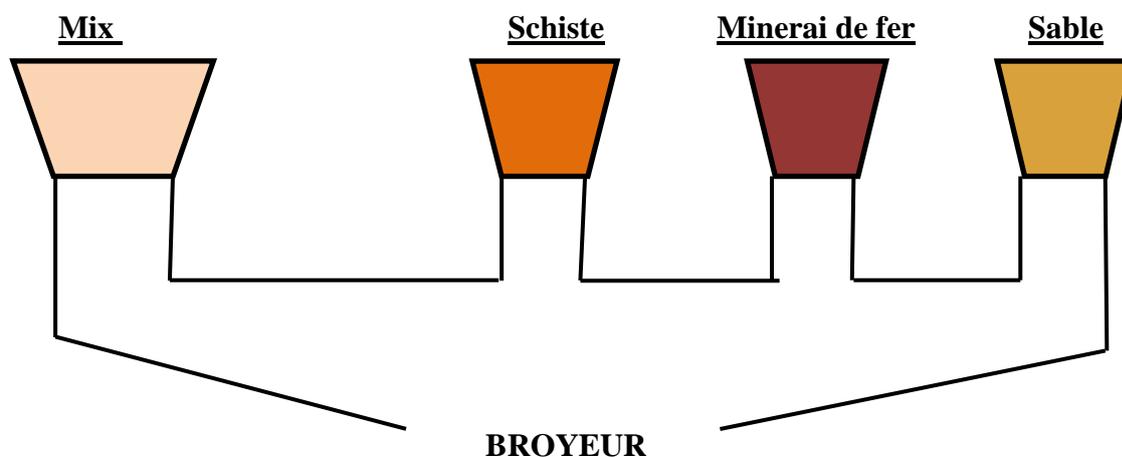


Figure 4: Schéma simplifié du doseur

c. Broyage et homogénéisation de la farine crue :

○ Broyage

Le broyage est une opération qui consiste à préparer un mélange homogène avec une bonne répartition granulométrique pour assurer les meilleures conditions de la cuisson de la farine crue.



Figure 5: Broyeur du cru

○ Homogénéisation

La farine produite est transportée à travers des aéroglisteurs vers un silo de stockage dont le rôle est d'homogénéiser la farine.

Ce silo a une capacité de stockage de 6000t, et est équipé par un système de fluidisation pour le mélange de la farine crue.

d. Production du clinker

Le clinker est un produit artificiel qu'on obtient par la cuisson de la farine crue dans un four rotatif. Cette production se fait suivant la ligne de fabrication suivante :

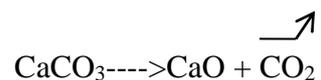
○ **La Tour de préchauffage à 5 cyclones**



Figure 6: Tour de préchauffage

Dans cette étape, on réalise un séchage et un préchauffage de la farine crue ainsi qu'une pré-calcination de cette farine.

Les gaz chauds formés lors de la cuisson dans le four sont aspirés par un ventilateur et traversent la tour de bas vers le haut alors que la farine crue est introduite dedans du haut et par gravité passe dans les cyclones successifs. Par transfert de chaleur, on obtient au pied de la tour une farine chaude déshydraté avec une température d'environ $T=1000^{\circ}\text{C}$ et une pré-calcination (décarbonatation) de la farine crue soit 85 à 90% suivant la réaction suivante :



○ **Le four rotatif**



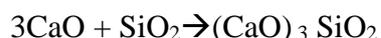
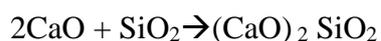
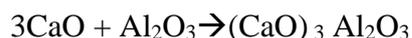
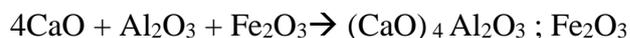
Figure 7: four rotatif

Le four joue le rôle d'un réacteur en forme de tube rotatif (vitesse= 5 tours /min) de 63 m de longueur, 4m de diamètre et une inclinaison estimée à 10%.

Le chauffage est assuré par une flamme placée à l'extrémité du four avec le charbon comme combustible principale et les grignons d'olives et les huiles comme combustibles alternatifs. Le four peut atteindre une température de 1450°C.

Théoriquement, on le répartit à 3 zones :

- ✚ **Une zone de transition** : elle correspond à l'entrée du four et à ce niveau que la matière passe à la phase liquide. On l'appelle aussi zone de décarbonations.
- ✚ **Une zone de cuisson** : c'est la zone la plus importante et la plus chaude du four (T= 1450°C), la matière se trouve à la phase visqueuse. Cette zone là est le siège de plusieurs réactions qui permettent la combinaison des minéraux :



Pour simplifier l'écriture on symbolise CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃, SiO₂ respectivement par C, A, F, S

Ex: (CaO)₃ Al₂O₃ = C₃A

- ✚ **Une zone de clinkérisation** : La matière passe à la phase solide, les cristaux issus de la zone de cuisson poursuivent leurs chemins en grossissant et en granulant formant ainsi le clinker grâce à l'inclinaison et la rotation du four.



Figure 8: Grains de clinker sortant du four

○ Refroidisseur à clinker

Le clinker sortant du four passe sur la grille vibrante du refroidisseur où il est refroidi rapidement par une air froid soufflé par le bas de la grille. Ce processus nous permet de récupérer la chaleur issue du clinker. L'air chaud généré est introduit ensuite dans le four pour aider à la combustion. Le refroidissement effectué a pour but de baisser la température du clinker afin de faciliter sa manutention et son stockage.

e. Broyage du ciment

Le clinker produit est introduit dans un doseur ainsi que les ajouts. Ces derniers seront mélangés par des proportions précises et passeront ensuite au broyeur.

Le broyeur utilisé est du même type que celui du broyage de la farine crue. Il produit environ 2800 tonnes/jr.



Figure 9: Broyeur ciment

f. Ensachage et expédition

Le ciment produit est stocké dans des silos qui alimentent par la suite les ateliers d'ensachage pour les livraisons en sac ou le dispositif de chargement pour les livraisons en vrac.



Figure 10: a) Livraison en sac / b) Livraison en vrac.

3. Les voies de fabrication du ciment

Il existe 4 principales voies de fabrication du ciment : la voie humide, semi-humide, semi-sèche, sèche. Cette dernière est celle qu'on utilise dans LAFARGE-HOLCIM.

La voie sèche diffère des autres par la nature du traitement thermique. Elle est aussi la plus économique, la plus rentable et la plus optimale de point de vue énergétique.

La matière première, une fois concassé, broyé, homogénéisée avant l'entrée au four, elle se chauffe à travers les siclons. À l'entrée du four rotatif, la farine séchée est sous une température de 900 à 1000°C.

Chapitre 2 : Service contrôle qualité

L'objectif du service contrôle de qualité est d'analyser et de contrôler de façon continue 7jr/7 et 24h/24, à travers plusieurs essais l'ensemble des phases de déroulement de la production depuis la carrière jusqu'à l'ensachage.

Les résultats de ces contrôles seront utilisés pour la correction des consignes des doseurs et qui seront rectifiés automatiquement depuis la salle de contrôle afin de vérifier la conformité de réalisation de la production.

Il faut préciser que tous ces contrôles doivent se dérouler en toute sécurité primordialement et avec précision. Le port des EPI est indispensable, de plus, pour quelques étapes certains équipements spéciaux s'ajoutent.

Ces EPI sont :



Figure 11: les EPIs

Section 1 : Essais chimiques

1. Perte au feu(PAF)

But : Détermination des espèces volatiles (CO_2 et H_2O) et le suivi thermique de la matière dans le procédé, elle est réalisée dans un four à $T=1000^\circ\text{C}$ pour une durée minimale de 20 min.

Mode opératoire : On a pesé la taille du creuset puis on a pesé environ 1g de l'échantillon, on le place au four à 1000°C pendant 20 min, on le laisse refroidir puis on pèse la masse finale.



Figure 12: Four T=1000°C

Le calcul du PAF est donné par la relation suivante :

$$\text{PAF \%} = ((m_c + m) - m_f) * 100 / m$$

Avec : m_c : masse du creusé en platine vide.

m : masse de l'échantillon.

m_f : masse finale après sortie du four

Coté sécurité :

Il faut noter que durant cet essai, on à affaire à plusieurs risques ce qui nous amène à tenir compte des mesures nécessaires pour les maîtriser.

Risques	Maitrises du risque
-Risque d'évacuations des quantités importantes de chaleurs, gaz et vapeurs nocifs.	-Maintenir la porte du four fermé.
-Risque d'incendie, forte fumée et odeur suite à une volatilisation.	-S'assurer de ne rien poser sur le four pour empêcher les échanges thermiques
-Risque de bruleur.	-Maintenir la distance de sécurité et port des gants

2. Finesse

But : détermination de la granulométrie des échantillons par différence de pression afin d'assurer le suivi du fonctionnement du broyeur et du séparateur. Ainsi, on pourra minimiser le cout de l'énergie du broyage. Cet essai se fait pour la farine crue, le clinker surbroyé et le ciment.

Mode opératoire : On a pesé 10 g de l'échantillon à l'aide d'une balance analytique puis on l'a mis dans un tamiseur de 45 µm après 3 min on pèse sa masse. On met le reste dans un tamiseur de 90µm et on reproduit la même chose.

Le calcul du taux de refus dans les deux tamis est donné par la relation suivante :

$$\text{Taux de refus \%} = \frac{m_2 * 100}{m_1}$$

Avec : m_1 : poids avant tamisage.

m_2 : poids après tamisage.



Figure 13: Balance analytique / Tamis / Tamiseur

3. Analyse par fluorescence RX

But : détermination des constituants de l'échantillon analysé afin d'assurer la rectification des consignes du doseur ainsi que la conformité du produit durant tout le procédé, en faisant passer l'échantillon sous rayon X.



Figure 14: Rayon X

Mode opératoire :

On prend une quantité de 20 g de l'échantillon qu'on met dans un acier pour le surbroyage.

On le fait passé ensuite dans un surbroyeur avec précaution. Après 3min, on récupère la matière et on la met dans une presse pastille. La pastille formée sera dirigée vers la salle du rayon X pour la faire passer dedans afin d'analyser les compositions de la matière.

Côté sécurité :

Risques	Maitrises du risque
-Risque d'auto-inflammation (poussière explosive) lors du broyage de la matière.	-Vérifier la fermeture du couvercle de l'assiette avant de la placer dans le dispositif
-Risque de surchauffe des pièces du surbroyeur.	-Ne pas utiliser le surbroyeur à plusieurs reprises sans arrêt



Figure 15: aciette/ surbroyeur/ presse pastille/ pastille

4. Le taux d'humidité

But : détermination du pourcentage d'eau contenue dans la matière en pesant la quantité de matière avant et après séchage dans l'étuve.

Le calcul du taux d'humidité est réalisé par la relation suivante :

$$\text{Taux d'humidité \% : } (m_1 - m_2) * 100 / m_1$$

Avec : m_1 : masse de l'échantillon avant séchage.

m_2 : masse de l'échantillon après séchage.

Section 2 : Essais physiques

1. La surface spécifique BLAINE

But : Détermination de la qualité de broyage du ciment.

Si la $SSB > 4000$: le broyage est bien fait, donc on aura une bonne finesse.

Si $SSB < 4000$: Le broyage est mal fait, les grains seront grossiers, donc la finesse ne sera pas conforme à la norme.

Mode opératoire : Dans la cellule de l'appareil on met la masse indiquée pesée par une balance analytique et on attend le résultat. Le principe de l'appareil repose sur le temps que fera l'air pour traverser le ciment.

Le calcul de SSB est réalisé par la relation suivante :

$$SSB = K \cdot \sqrt{t}$$

Si le temps augmente, les grains sont bien broyés et fins, la surface spécifique augmente aussi.

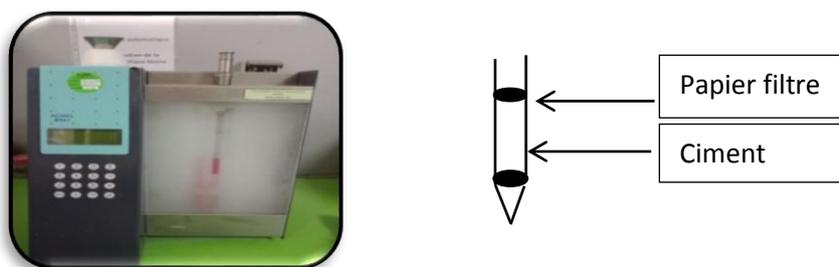


Figure 16: Appareil de mesure SSB

2. La prise

But : détermination du temps de prise initial et final, c'est-à-dire détermination du temps pour lequel le ciment commence à durcir (P.I) et celui de son durcissement complet (P.F).

Cette opération ne peut être effectuée que sur un mortier avec une consistance entre 4 et 7. Elle se réalise en deux étapes. Pour une première étape elle s'effectue sur l'appareil de Vicat afin de déterminer la consistance. Une fois on obtient le mortier à la consistance voulue, on passe au prismètre. C'est dans cette étape-là, qu'on détermine la prise initiale et finale.

Mode opératoire :

○ Etape 1 : mesure de la consistance

On prépare un mortier, en mélangeant dans un malaxeur 500g de ciment étudié et une valeur d'eau de gâchage aléatoire (selon le type de ciment). On met le mortier dans un moule tronconique puis on mesure la consistance à l'aide d'un piston gradué qui tombe par chute libre verticalement sur le

mortier et indique sa valeur. On recommence la même opération jusqu'à trouver la valeur d'eau de gâchage convenable pour la consistance souhaitée.

Si <4 : Il faut diminuer la quantité d'eau.

Si >7 : Il faut ajouter plus d'eau.



Figure 17 : moule tronconique/ appareil de Vicat

○ **Etape 2 : détermination de la prise.**

On prend le même mortier préparé et on le met dans l'appareil de VICAT. On la règle de telle façon à ce qu'on aura une immersion de l'aiguille dans le ciment par chute libre chaque 10 min.

A la fin nous obtiendrons une sorte de courbe qui permettra de déterminer le temps de prise initiale, qui doit dépasser les 90 min, en multipliant le nombre de lignes semblables par 10, et le temps de prise finale en multipliant le total des lignes par 10.



Figure 18:prismètre

3. L'expansion

But : Mesurer la déformation de l'échantillon et s'assurer que le ciment ne contient pas des substances susceptibles de provoquer le gonflement du ciment principalement la chaux libre.

On la mesure à l'aide des aiguilles de Le Chatelier en calculant leur ouverture après durcissement du ciment.

Mode opératoire : on travaille toujours avec le même mortier, on le met dans les aiguilles de Le Chatelier puis on les place sous un poids de 70g, après durcissement on les met dans un bouillard à 100°C après on les récupère et mesure l'écart après séchage.

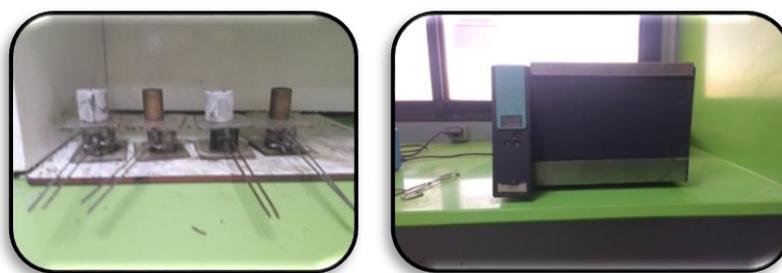


Figure 19: aiguille de le Chatelier/ bouillard

4. La résistance

But : détermination de la résistance du ciment à la flexion et à la compression.

Mode opératoire : à $T=20^{\circ}\text{C}$, on prépare un mortier en mélangeant 450g de ciment étudié, 225g d'eau de gâchage et 1 kg de sable normalisé à l'aide d'un malaxeur. On les place dans un moule de 3 colonnes $4*4*12$ l'une pour 2 jrs, 7jrs, 28jrs, puis on les place dans la table à choc. Après on les laisse 24H à l'air libre. On récupère les éprouvettes, ensuite, on les met dans une chambre humide avec un taux d'humidité supérieur à 95%. À la fin, on mesure leur résistance en MPa.

N.B :

- 2 jours : résistance à court terme pour la correction.
- 7 jours : résistance à moyenne terme pour observer l'évolution.
- 28 jours : résistance à long terme pour la résistance finale.

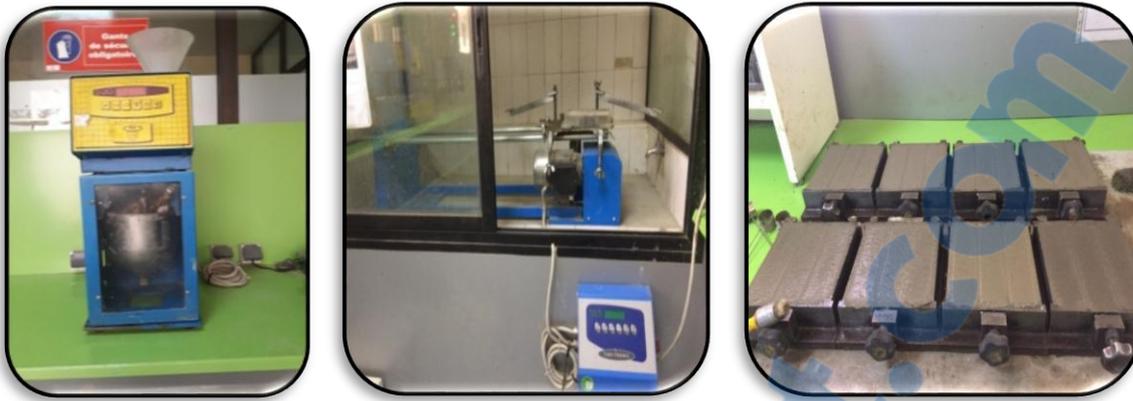


Figure 20 : malaxeur/ table à choc/ moules



Figure 21 : éprouvettes/ chambre humide

- **Flexion** : Rupture sur le mortier tout en affichant la force supportée en MPa.
- **Compression** : Fissure sur la face latérale du mortier, l'appareil à presse indique ensuite la pression à laquelle le mortier a résisté.



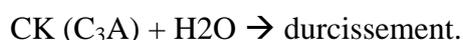
Figure 22: Appareil flexion et compression

Partie expérimentale

Chapitre 3 : Optimisation du gypse

1. Expérience

Pour déterminer le rôle du gypse, nous avons pensé à travailler avec un ciment de type CPJ45 (parce qu'il représente 70% de la production totale du ciment) sans gypse. On a remarqué que ce ciment a durcis rapidement ce qui est non souhaité et non conforme à la norme. Les C_3A , contenus dans le ciment, par contact avec l'eau se dissolvent et dégagent une forte quantité de chaleur ce qui causé la prise rapide remarquée :



Notons que la norme en vigueur exige que le temps de prise initiale doit être supérieur à 130min en respectant le rapport $E/C = 0.5$ (avec E est la quantité d'eau de gâchage et C'est la quantité du ciment).

L'expérience montre que pour obtenir un mortier qui reste maniable pendant leurs premiers instants après le gâchage, il faut que l'hydratation du C_3A soit modifiée par un régulateur de prise.

Le gypse contient des sulfates qui enveloppent les C_3A en retardant ainsi la prise. Le gypse est donc un retardateur de prise. Sauf qu'à chaque ajout du gypse, une diminution du taux de calcaire s'impose, par conséquent la résistance varie. La résistance est l'une des caractéristiques importantes à contrôler dans le ciment. Pour notre ciment on doit trouver une valeur finale correspondante à 45MPa.

Le rôle du gypse reste primordial. Vu son intérêt, l'objectif de mon travail et d'étudier son influence sur un ciment de type CPJ45. Nous sommes amenés à varier le taux des sulfates dans le ciment et cela en jouant sur le pourcentage d'ajout du gypse dans le ciment depuis la salle de contrôle, partant d'une valeur minimum à une valeur maximum, et observer son impact sur l'évolution de la prise et de la résistance dans le ciment.

Pourquoi pas d'autres sulfates ?

L'utilisation du gypse comme retardateur de prise n'a jamais été aléatoire, tout au contraire, elle a tenu compte de plusieurs raisons :

- ✓ Parmi les sulfates, le gypse est le moins coûteux.
- ✓ Il est facile à broyer, donc il y aura une conservation d'énergie.
- ✓ Il n'est pas corrosif, préservation des parties métalliques des dispositifs de dosage et de stockage.
- ✓ Il ne modifie pas la teinte du ciment.

Objectif :

L'optimisation du taux de gypse a pour objectif de :

- ❖ Augmenter les performances mécaniques du ciment 2j, 7j, et 28j.
- ❖ Optimiser le coût de revient du ciment.

Essais physico-chimique :

L'essai consiste à effectuer des prélèvements du ciment CPJ45 en variant le pourcentage du gypse de 2% à 12% et en fixant le pourcentage du clinker à 60%.



Figure 23 : Prise de prélèvement

Mode opératoire

On a fait 8 prélèvements variés pour chaque pourcentage de gypse. Sur tous les échantillons prélevés on a pratiqué des analyses chimiques et des essais physico-chimique afin de tracer les courbes de l'évolution de la résistance et de prise initiale en fonction de la variation de SO_3 . Ces courbes permettent de déterminer l'optimum de SO_3 pour déterminer le pourcentage efficace du gypse avec un temps de prise convenable et une bonne performance mécanique.

2. Essai chimique sur la Matière première

Durant ces essais, nous avons travaillé avec un ciment de type CPJ45 constitué de la recette suivante :

	CALCAIRE	GYPSE	CLINCKER
PAF	42.52	20.24	0.4
Humidité	3.85	4.94	---
SiO ₂	2.13	11.46	20.86
Al ₂ O ₃	1.90	2.24	5.07
MgO	0.64	2.22	0.97
SO ₃	0.88	36.03	1.18
Fe ₂ O ₃	2.43	1.69	3.36
CaO	52.79	33.68	66.59
K ₂ O	0.29	0.41	0.92
Na ₂ O	0.07	0.14	0.12

Tableau 1: Compositions chimiques de la matière première utilisée

*Calcaire : roche sédimentaire composée principalement de CaCO₃. Les carbonates de calciums lorsqu'ils atteignent T=850°C par dissociation on a la formation de la chaux dans le ciment. De ce fait le calcaire influence sur la résistance et l'expansion du ciment. Le calcaire utilisé provient du deuxième gradin.

*Clinker : roche constituée à partir du cru qui est le constituant principale du ciment. C'est la matière la plus chère durant toute la fabrication du ciment. Si on utilise un clinker non cuit, il va influencer la qualité du ciment notamment sa résistance.

*Gypse : minéral sédimentaire très répandu, composé de sulfates de calcium très hydraté CaSO₄; 2H₂O, on l'ajoute au clinker durant le broyage du ciment. C'est un retardateur de prise.

N.B :

Ce tableau servira comme référence sur la recette du ciment utilisé. La valeur optimum du gypse qu'on obtiendra sera pour un ciment de cette composition.



3. Exploitation des résultats

a. Les résultats des essais chimiques

Ce tableau récapitule l'ensemble des résultats obtenus durant les essais chimiques :

Tableau 2: Tableau des résultats des analyses chimiques du ciment en fonction de la variation du taux de gypse

	2% Gyp	4%Gyp	5.5%Gyp	6%Gyp	7.4%Gyp	8%Gyp	9%Gyp	12%Gyp
PAF	14.73	14.90	14.55	14.68	14.70	14.73	14.12	13.98
Finesse 45 µm	8.2	8.26	7.5	8.4	7.10	7.6	8.01	8.00
Finesse 90 µm	0.33	0.45	0.12	0.25	0.21	0.25	0.21	0.31
SO ₃	1.66	2.44	2.51	2.69	2.92	3.26	3.50	3.85

La courbe ci-dessous représente les analyses chimiques du ciment en fonction de la variation du taux de gypse.

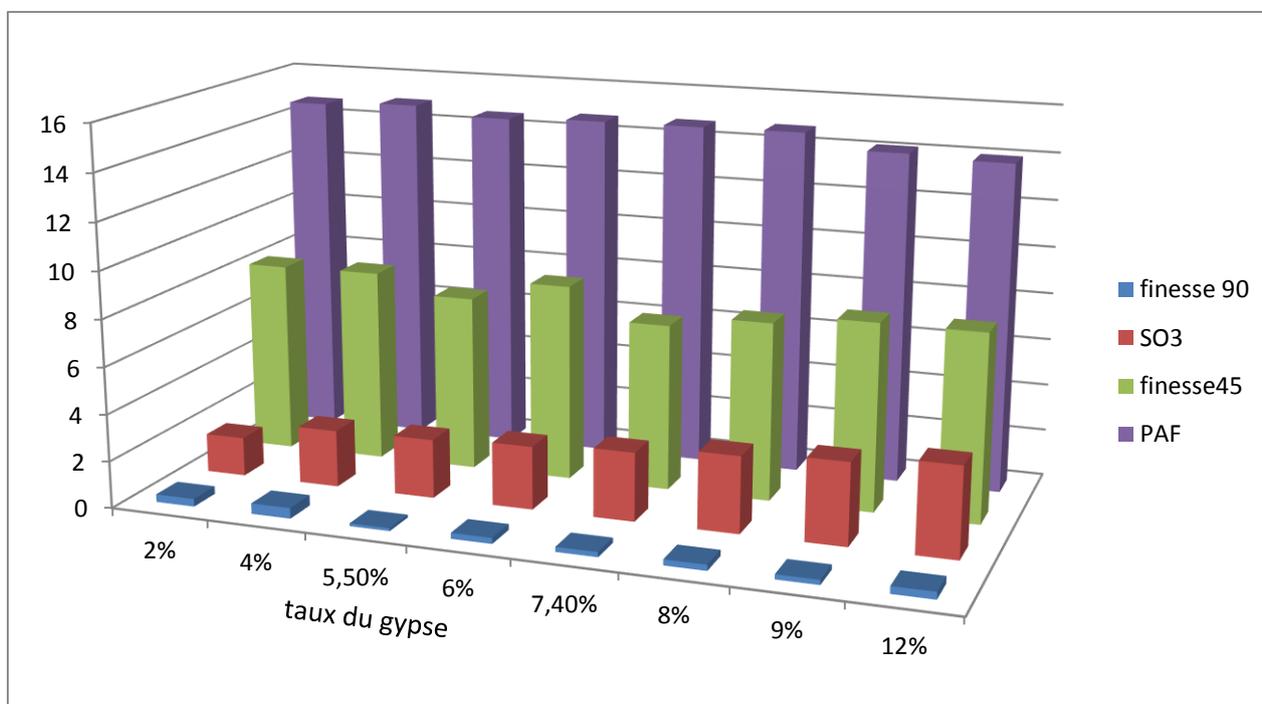


Figure 24: résultats des analyses chimiques du ciment en fonction de la variation du taux de gypse

→ Interprétation

Les résultats des essais chimiques montrent que l'ajout du gypse ne modifie pas les caractéristiques chimiques du ciment. Cela se reflète par la stabilité de la PAF et la finesse.

Ce qui change considérablement est le taux des sulfites (SO_3), on remarque que pour chaque élévation du taux de gypse, le % en SO_3 augmente.

Il faut noter qu'on rencontre les sulfites dans le clinker et le calcaire aussi mais à très faible quantité.

Vu que le SO_3 est majoritaire dans le gypse c'est ce dernier qui est le responsable sur sa variation.

b. Les résultats des essais physiques

Le tableau suivant résume l'ensemble des résultats obtenus durant les essais physiques :

Tableau 3: Tableau des résultats des essais physiques en fonction de la variation du gypse et de SO_3

% Gypse	2%	4%	5.5%	6%	7.4%	8%	9%	12%
% SO_3	1.66	2.44	2.51	2.69	2.92	3.26	3.50	3.85
EG(g)	28.6	27.8	27.3	27	26.5	26.2	25.4	25
PI(s)	100	130	140	150	180	190	295	310
PF(s)	175	245	250	260	300	310	315	330

La courbe ci-dessous représente l'évolution du temps de prise initial (le moment où commence le durcissement) en fonction de SO_3 qui est l'indicateur du gypse et le responsable du durcissement.

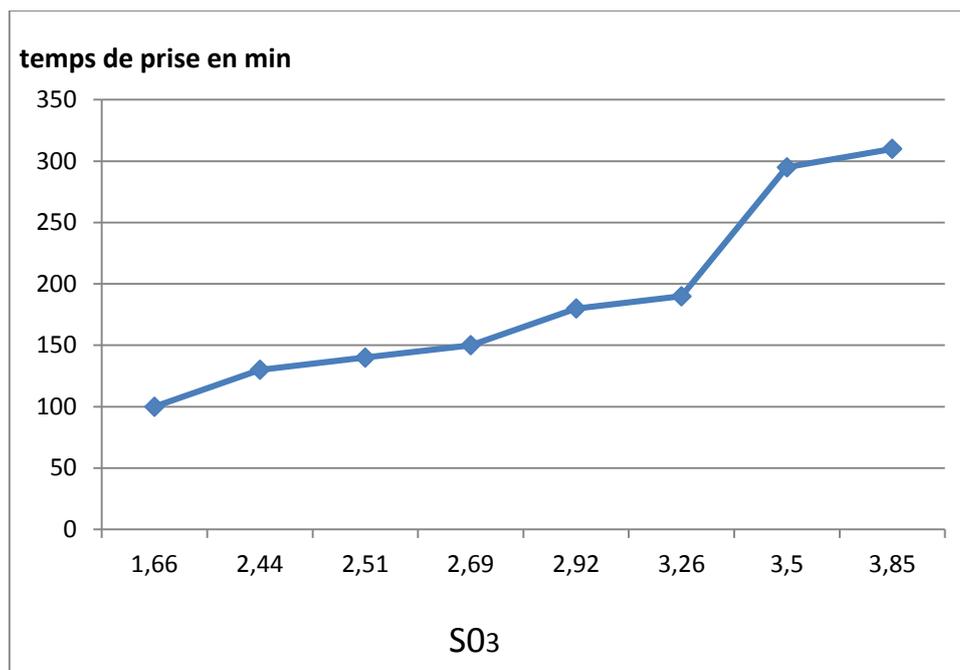


Figure 25: Courbe de l'évolution de la prise initiale (en min) en fonction du pourcentage en SO₃

→ Interprétation

Les essais physiques sur la prise, montrent que pour un taux de SO₃ élevé, le temps de prise augmente aussi. Cela revient que le fait que SO₃ forme une pellicule autour de C₃A donc l'hydratation de ce dernier prend encore plus de temps. Du coup, le durcissement est retardé.

N.B

Il faut prendre en considération que le rapport E/C= 0,5

Ce qui peut être illustré par le schéma ci-dessous :

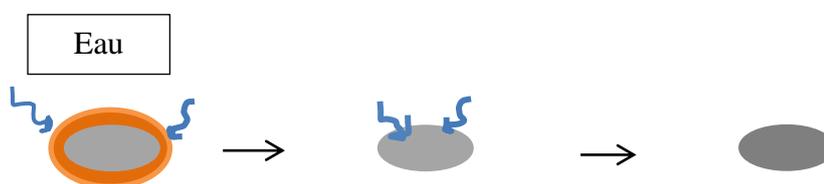


Figure 26: Schéma simplifié illustrant la prise après contact du ciment avec l'ajout du gypse et de l'eau

: Pellicule de SO₃ formée provenant principalement du gypse, autour des C₃A contenus dans le ciment.

● : C₃A avant contact avec l'eau.

● : C₃A durcis rapidement après contact avec l'eau parce que sa réaction d'hydratation est fortement exothermique.

c. Les résultats des essais mécaniques

Le tableau 4ci-dessous représente l'évolution de la résistance en fonction du pourcentage en SO₃ :

Tableau 4: Résultats des résistances en fonction du % en SO₃

%SO ₃	%Gypse	2 Jours (MPa)		7 Jours (MPa)		28 Jours (MPa)	
		Flexion	compression	flexion	compression	flexion	Compression
1.66	2%	2.6	15.9	4.5	27.75	5,6	34,4
2.44	4%	2.4	17	4.7	26.2	5,8	35,2
2.51	5.5	2.8	18.3	5	28.6	5,9	38,1
2.69	6	2.7	18.85	5.1	28.85	6	38,4
2.92	7.4	2.5	17.1	4.6	26.5	5,7	36,8
3.26	8	2.3	16.5	4.7	26.3	5,65	35,4
3.50	9	2.4	15.9	4.3	24.85	5,5	34
3.85	12	2.2	14.2	4.5	24.4	5,4	33,2

La courbe ci-dessous représente la compression de 28 jours en fonction de SO₃.

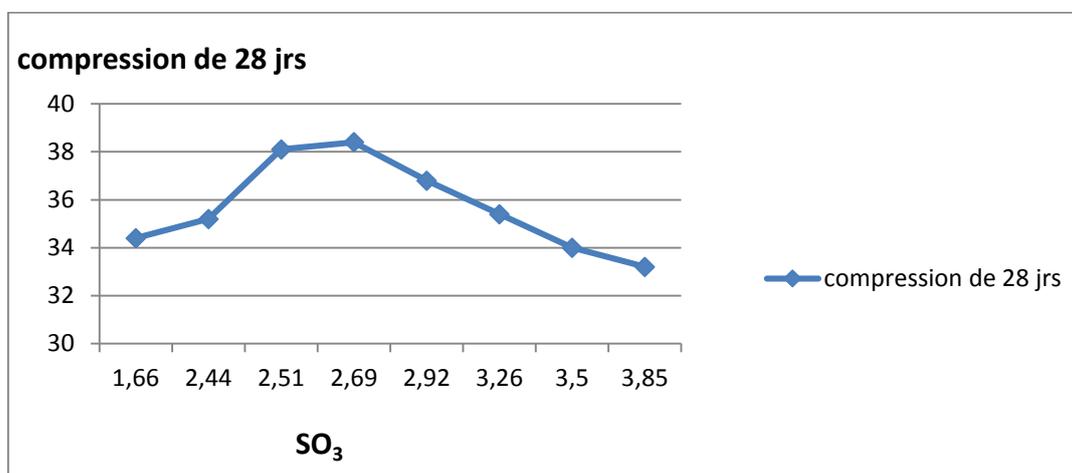


Figure 27:Résultats de la compression de 28 jours en fonction du % en SO₃

→ Interprétation

On ne tient pas compte de la flexion comme critère sur la résistance parce qu'elle n'est pas normalisée. Donc, ce qui nous importe ici c'est la relation entre la variation des sulfates et l'évolution

de la résistance. On observe que la résistance augmente au début jusqu'à atteindre un maximum situé vers 2.69, puis commence à décroître.

4. Représentation combinée des résultats

La figure 28 représente la variation de la résistance à la compression et le temps de prise en fonction de SO_3 .

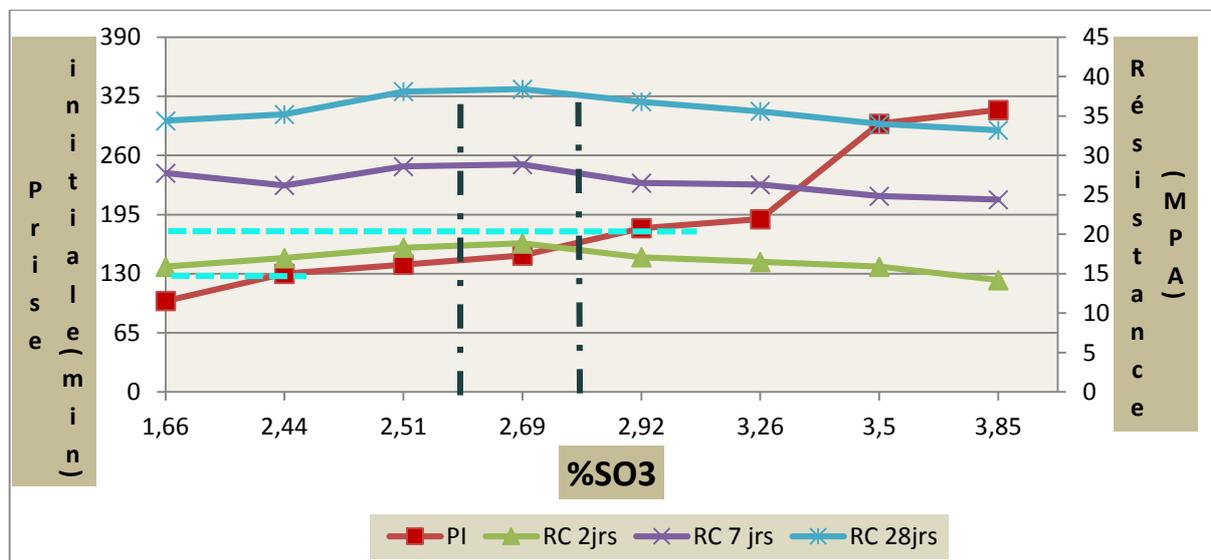


Figure 28: Résistances à la compression à 2j, 7j et 28j et le temps de prise du ciment en fonction du %SO₃

→ Interprétation

Ce graphe regroupe les résultats des essais de la résistance à la compression des éprouvettes et le temps de prise initiale en fonction du taux de SO_3 dans le ciment CPJ45 à 2jrs, 7jrs et 28jrs.

On remarque que les résistances à la compression du ciment augmentent lorsque le pourcentage du gypse augmente. La courbe passe par un maximum correspondant à un taux de SO_3 de 2,69 puis décroît. On remarque aussi que le temps de prise augmente avec l'augmentation du taux de SO_3 .

Conclusion

Ce séjour m'a permis :

De conclure que le taux de gypse ajouté au clinker est une caractéristique significative influençant les propriétés physico-chimiques du ciment et les résistances mécaniques.

Pour cela on doit utiliser un taux optimum de SO_3 compris entre 2.6% et 2.8 avec une prise entre 130 min et 175 max, pour produire un ciment CPJ 45 répondant aux exigences de la norme marocaine et au besoin de la société Lafarge-Holcim.

→ Donc la valeur optimale du gypse doit varier entre 5.5% et 7.4%.

Mon séjour dans l'entreprise m'a offert une bonne expérience enrichissante aussi bien sur le plan pratique et théorique que sur le plan relationnel et développement personnel. Il m'a permis de mettre en application mes connaissances théoriques acquises durant ma formation à la FST ainsi qu'une confrontation réelle avec le monde du travail.