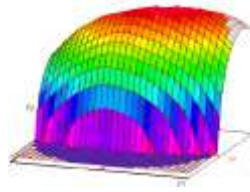




Année Universitaire : 2020-2021



Master Sciences et Techniques CAC Ageq
Chimiométrie et Analyse Chimique : Application à la gestion de la
qualité

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et
Techniques

Optimisation du pourcentage de gypse dans le
ciment CPJ45

Présenté par:

Khaoula ait timachchirine

Encadré par:

- Pr. CHTIOUI HICHAM (FST Fès)
- Mr. MOUHSSIN LAGMAH (LafargeHolcim Meknès)

Soutenu Le 12 Juil. 2021 devant le jury composé de :

- Pr. BOUAYAD ABDESSALAM
- Pr. CHTIOUI HICHAM
- Pr. HAUDI AMAL

Stage effectué à : LafargeHolcim Meknès.

Dédicace

Je dédie ce travail à toutes les personnes que j'aime et qui sont chères à mes yeux.

Je pense notamment à :

Mes très Chers Parents Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de vos sacrifices, de l'amour et de l'affection dont vous n'avez jamais cessé de m'entourer toutes au long de ces années d'études.

Mes amis avec qui j'ai partagé des moments de bonheur et qui n'ont pas cessé de me soutenir dans les moments les plus durs.

Mes professeurs et toutes les personnes qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

Mes grandes parents, puisse Dieu les accueillir dans son infinie miséricorde.

Remerciements

Au terme de ce projet de fin d'études, Je tiens à remercier tout le personnel de Lafarge Holcim Meknès pour son accueil chaleureux, son soutien tout au long de ce stage et les diverses connaissances qu'ils ont partagé avec moi durant toute cette période. Je tiens ensuite à remercier tout particulièrement les membres du service de qualité, à savoir mon tuteur en entreprise Mr. Mouhssin LAGMAH ainsi que Mr. Taoufik Aziz OUAZANI pour leur disponibilités, leurs précieux conseils, et leur bonne humeur au quotidien.

Je tiens également à exprimer ma profonde reconnaissance à mon tuteur universitaire Pr. CHTIOUI qui m'a accompagné durant toute ce travail pour son disponibilité, pour la confiance qu'il a su m'accorder et les conseils judicieux qu'il m'a prodigué, ses qualités d'écoute et son encadrement tout au long de la réalisation de ce projet, aussi je tiens à remercier les membres de jury Pr .HAOUDI AMAL et Pr. BOUAYAD ABDESSALAM d'avoir porté intérêt à ce travail.

Enfin, je tiens à remercier le professeur responsable du Master CAC Agiq, M. Taoufik Seffaj, et tous les professeurs qui m'ont permis de compléter ma formation par leurs cours. Ces connaissances supplémentaires m'ont permis d'être plus compétente lors de cette formation en entreprise et de trouver des solutions auxquelles je n'aurais peut-être pas pensé auparavant.

Je vous remercie infiniment

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
PARTIE 1: BIBLIOGRAPHIE SUR L'USINE LAFARGE HOLCIM MEKNES.....	2
CHAPITRE I : PRESENTATION DU GROUPE LAFARGE HOLCIM MAROC.....	3
1. HISTORIQUE DU GROUPE LAFARGE MAROC	3
2. GROUPE LAFARGE HOLCIM MAROC	3
3. DOMAINES D'ACTIVITE DU GROUPE	3
4. DESCRIPTION DE L'USINE DE MEKNES.....	4
5. ORGANIGRAMME	4
CHAPITRE 2 : DEFINITION ET PROCESSUS DE FABRICATION DE CIMENT	5
1. DEFINITION ET COMPOSITION DU CIMENT	5
2. PROCEDE DE FABRICATION DU CIMENT	6
2.1. Extraction des matières premières	6
2.2. Pré-homogénéisation	7
2.3. Broyage « cru ».....	7
2.4. Homogénéisation	7
2.5. Production de clinker	8
2.5.1. Préchauffage de la matière	8
2.5.2. Cuisson	8
2.5.3. Refroidissement :	9
2.6. Broyeur à boulets	9
2.7. Stockage et expédition	10
CHAPITRE 3 : QUALITE A LAFARGE HOLCIM USINE DE MEKNES	10
1. INTRODUCTION	10
2. ANALYSES REALISEES AU LABORATOIRE DE LAFARGEHOLCIME MEKNES	11
2.1. Essais chimiques :	11
2.1.1. Analyse par fluorescence X	11
2.1.2. Détermination de la teneur en chlorure	12
2.1.3. Perte au feu	12
2.1.4. Dosage de la chaux libre	13
2.1.5. Détermination du taux d'humidité.....	13
2.2. Essais physiques et mécaniques.....	13
2.2.1. Analyse granulométrique	13
2.2.2. Surface spécifique Blaine	14
2.2.3. Gâchage	15
2.2.4. Résistance à la flexion et à la compression.....	15
2.2.5. Mesure du Temps de début de prise et de fin de prise	16
3. INDICES CIMENTIERs.....	16
3.1. Les minéraux de bogue	16
3.2. Indice de déficience en chaux Δ	17
3.3. Module LSF (Facteur de saturation en chaux)	17
3.4. Module KST (Standard de chaux)	17
3.5. Module Silicique (MS)	17
3.6. Module Alumino-ferrique (MAF)	18

3.7. Pourcentage de carbonate.....	18
PARTIE 2:OPTIMISATION DE POURCENTAGE DE GYPSE DANS LE CIMENT CPJ45	19
INTRODUCTION	20
CHAPITRE1 : GENERALITES SUR LE GYPSAGE OPTIMUM	21
1. MECANISME D'HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND.....	21
2. ROLE DE L'AJOUT DE GYPSE SUR L'HYDRATATION DE CIMENT.....	22
3. FACTEURS AFFECTANT LES RESISTANCES DE CIMENTS	23
3.1. Teneur en CAO « Cuisson de la matière ».....	24
3.2. Finesse	24
3.3. Teneur en C ₃ S dans le clinker	24
3.4. «SO ₃ » Composé principale de gypse :.....	24
CHAPITRE 2 : METHODE DIRECTE DE GYPSAGE OPTIMUM.....	25
1. OBJECTIF	25
2. TYPE DE QUALITE DU CIMENT :	25
3. REPRESENTATION GENERALE DE MATIERES UTILISEES POUR CETTE METHODE :.....	25
3.1 Clinker :.....	25
3.2. Gypse :.....	25
3.2. Calcaire :.....	26
4. ANALYSE DES MATIERES PREMIERES ET LES AJOUTS PAR LE SPECTROMETRE DE FLUORESCENCE DES RAYONS X (RFX) :	26
4.1. Sources des oxydes minéraux dans les matières premières et les ajouts :.....	26
4.2. Représentation graphique des résultats par The Unscrambler.....	28
5. METHODE DIRECTE DE GYPSAGE	29
5.1. Principe.....	29
5.2. Calcul de la recette de gypsage et du point de consigne par Excel :	29
5.3. Echantillonnage	31
5.4. Réalisation des essais	32
5.5. Analyse effectuées	33
5.5.1. Analyse par spectrométrie de fluorescence X	33
5.5.2. Détermination le refus de chaque échantillons.....	33
5.5.3. Essaie de résistance à compression	34
6. RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	34
6.1. Résultats d'analyse de fluorescence X	34
6.2. Pourcentage de composants pour chaque échantillons.....	36
6.3. Suivis de quelques paramètres physico-chimiques	36
6.4. Résultats de Gâchage et de temps de prise	37
6.5. La représentation graphique de ces résultats est donnée par les figures 22 à 23 38	
6.6. Détermination du cout avec le revenu de l'essai du ciment à l'échelle industriel.....	41
7. APPLICATION DU PLAN DE MELANGE POUR DETERMINER UNE COMPOSITION DE CPJ45 DONNE UNE RESISTANCE A 28 JOURS OPTIMALE	42
7.1. Définition de PLAN DE MELANGE.....	42
7.2. Objectif :	43
7.3. Génération de la matrice d'expérience.....	43
7.4. Mode opératoire	44
7.5. Coefficients de modèle mathématique :	45

7.6. Validation du modèle de réponses	46
7.7. désirabilité et Optimum	47
7.7.1. Résultats de l'étude de la désirabilité	47
7.7.2. Détermination de de l'optimum	48
7.7.3. Livrable	48
7.8. Etude de cout	48
CONCLUSION GENERALE	49
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:	50

Listes des figures

Figure 1 : Répartition des sites de production de groupe Lafarge Holcim Maroc	3
Figure 2: Organigramme de groupe LafargeHolcim Maroc	4
Figure 3: Chaîne de transformation du calcaire et d'argile en ciment	5
Figure 4: Flowsheet du processus de fabrication du ciment Portland.....	6
Figure 5: Carrière d'usine de Meknes	7
Figure 6: Broyeur cru verticale	7
Figure 7: les cyclons de préchauffage	8
Figure 8: Four rotatif d'usine de Meknès	9
Figure 9: Etape de cuisson de clinker.....	9
Figure 10: Schéma d'un broyeur à boulets avec ses parties principales.....	10
Figure 11: Titreur des ions en chlorures.....	12
Figure 12: Tamis avec différents diamètres 200 ; 90 ; 45 µm	14
Figure 13: Tamiseur	14
Figure 14: Perméabilimètre de Blaine.....	14
Figure 15: schéma présentation des forces exercées par compression.....	15
Figure 16: schéma présentatif des force exercé par flexion	16
Figure 17: dégagement de chaleur en fonction de Temps d'hydratation	21
Figure 18: Représentation des individus dans l'espace des variables (Scores).....	28
Figure 19: Représentation des variables dans l'espace individus (X-loadings).....	28
Figure 20: limite maximale et minimale de doseur de gypse.....	29
Figure 21: Moule à ciment en acier.....	34
Figure 22: courbe des résistances en fonction de % de SO ₃	38
Figure 23: courbe de résistance de 1 ^{er} jour en fonction de %SO ₃	38
Figure 24: courbe de résistance de 2 ^{ème} jour en fonction de % SO ₃	39
Figure 25: courbe de tendance de résistance de 7 ^{ème} jours en fonction de %SO ₃	39
Figure 26: courbe de tendance de résistance de 28 ^{ème} jours en fonction de %SO ₃	40
Figure 27: Début de prise en fonction de %SO ₃	40
Figure 28: Broyeur de laboratoire	44
Figure 29: calcaire après concassage	45
Figure 30: calcaire avant concassage	45
Figure 31: clinker avant concassage.....	45
Figure 32: clinker après concassage.....	45
Figure 33: Gypse avant concassage	45
Figure 34: Gypse après concassage.....	45
Figure 35: Fonction de désirabilité élémentaire de la	47
Figure 36: Variation de la désirabilité dans le plan : clinker, Calcaire, gypse.....	47
Figure 37: Recherche de l'optimum par Nemrod	48

Liste des tableaux

Tableau 1: Resumé sur l'hypothèse microstructure de gypsage optimum	23
Tableau 2: Type de qualité du ciment	25
Tableau 3: Table d'analyse de calcaire	26
Tableau 4: Table d'analyse de l'argile	26
Tableau 5: Table d'analyse de gypse	27
Tableau 6 : Table d'analyse des matières premières et les ajouts en termes de moyen	27
Tableau 7: Production régulière (recette connue)	30
Tableau 8: Essai avec un maximum de SO_3 (recette ajustée)	30
Tableau 9: ajusté la recette de ciment par le minimum de $\%SO_3$	31
Tableau 10: Echantillonnage de l'essai	31
Tableau 11: Résultats de FRX des échantillons de première étape	34
Tableau 12: Résultats de FRX des échantillons de 2 ème partie de l'essaie	35
Tableau 13: Résultats de FRX des échantillons de 3 ème partie de l'essaie	35
Tableau 14: les %des composants pour chaque échantillons	36
Tableau 15: Analyses physique et chimique	36
Tableau 16: Essais mécaniques (gâchage et temps de prise)	37
Tableau 17: Prix de calcaire, gypse et clinker en DH/t	41
Tableau 18 : Cout de ciment MAD/ton en fonction de $\%SO_3$	41
Tableau 19: Quantité de production du ciment CPJ45 en tonne par année	41
Tableau 20: Les nouveaux essais de fabrication du ciment CPJ45 trouvé par la méthode directe	42
Tableau 21: limites hautes et basses des 3 composées utilisées en plan de mélange	43
Tableau 22: plan d'expérimentation généré par Nemrood	43
Tableau 23: Coefficients de modèle mathématique	45
Tableau 24: Paramètres de validation de modèle	46
Tableau 25: Estimation du revenu pour la composition optimale du CPJ45 trouvé par le plan de mélange	48

Liste des abréviations

A (Al_2O_3): Alumine

CaO : Chaux libre

C_3A : Aluminat

C_4AF : Aluminoferrite

C_2S : Bélite

C_3S : Alite

NM : Norme Marocaine

CPA : Ciment portland

F : Ferrite (Fe_2O_3)

H : Eau (H_2O)

K : Oxyde de potassium (K_2O)

M : Magnésie (MgO)

N : Oxyde de sodium (Na_2O)

S : Silice (SiO_2)

R : Refus

g : Gramme

FRX : fluorescence de rayons X

ACP : Analyse en composantes principales

Introduction générale

Le ciment est le matériau de construction le plus utilisé à travers le monde, de grosses quantités de ciment sont utilisées chaque année. Les règles et les principes de fabrication du ciment ont été développés par l'anglais M. Johnson au 19^{ème} siècle.

L'usine LAFARGE HOLCIM Ciments de Meknès est la deuxième puissance productive du groupe LafargeHolcim-Maroc.

Leader national des matériaux de construction, elle ne cesse pas de déployer ses efforts pour tenir et améliorer sa position, en adoptant une politique de gestion très rigoureuse de la disponibilité de ces outils de production. Les cimenteries évoluent dans un contexte où la performance ne réside plus seulement dans leur capacité à fabriquer ou à vendre, mais également dans leur capacité à produire de la qualité, tout en maîtrisant leur processus et en minimisant leurs coûts de production. C'est pourquoi chaque usine de ciment mène de nombreuses recherches et des études dans le but d'améliorer la qualité du ciment. Car le ciment est une substance dont un défaut peut entraîner de graves conséquences. Parmi ces études, nous parlons du pourcentage de chaque composé de ciment, qui doit être précis dépend des exigences du type de ciment à fabriquer. Dans ce rapport, nous nous concentrerons sur le gypse, et nous avons discuté tout ce qui s'y rapporte. L'élément principal de gypse est le « SO_3 », qui joue le rôle d'un régulateur du temps de prise de ciment. L'objectif de ce rapport est de chercher expérimentalement le pourcentage optimale de gypse qu'il faut ajouté dans le ciment CPJ45, Cette optimisation a été conduite à travers le suivi des performances des ciments (composition chimique), pâtes de ciment (temps de prise) et mortiers (résistance à la compression), tout en variant la teneur des ciments en gypse entre 1 et 8% en masse.

Ce stage de fin d'étude s'est déroulé au sein de l'entreprise LAFARGE HOLCIM Meknès,

La découverte de l'entreprise m'a montré un aspect intéressant du milieu du contrôle de qualité route. Ainsi, mon sujet portait le thème : « Optimisation de pourcentage de gypse dans le ciment CPJ45 ». Par ailleurs, mon rapport de stage est divisé en 2 parties :

Nous commencerons dans un premier temps par la présentation de la société Lafarge Holcim, et tous ce qui concerne la fabrication de ciment et le contrôle de qualité, puis La 2^{ème} partie ou nous nous intéresserons à l'optimisation du pourcentage de gypse dans le ciment CPJ 45.

Partie 1 :

Bibliographie sur l'usine Lafarge Holcim Meknès

CHAPITRE I : Présentation du groupe Lafarge Holcim Maroc

1. Historique du groupe Lafarge Maroc

L'industrie des matériaux de construction, dont le ciment constitue la matière de base, détient une place importante dans le secteur des industries de transformation. C'est à partir de 1912 que le ciment commença à être utilisé au Maroc, d'abord pour certaines réparations, puis pour les constructions principalement à Casablanca. Ainsi, il fut décidé en 1913, l'implantation de la première cimenterie à Casablanca avec une capacité de production annuelle de 10 000 tonnes [1].

2. Groupe Lafarge Holcim Maroc

lancé le 15 juillet 2015 En 2015, Holcim fusionne avec le n° 1 mondial du secteur, le groupe français Lafarge . Le nouveau groupe est officiellement sous le nom de LafargeHolcim [1].

3. Domaines d'activité du groupe

A travers ses différentes filiales et participations, le groupe Lafarge Holcim Maroc opère dans diverses activités notamment le ciment, le béton, le granulats, le plâtre. Les sites industriels du groupe Lafarge Holcim Maroc comprennent pour chaque activité [1] :

- Ciment (7 usines et 2 stations de broyage) ;
- Béton (22 sites) ;
- Granulats (3 carrières et 1 unité de concassage) ;
- Plâtre (1 usine) ;
- Chaux (1 usine) ;
- Mortier ciment (1 usine) ;



Figure 1 : Répartition des sites de production de groupe Lafarge Holcim Maroc

4. Description de l'usine de Meknès

Au début des années 50, le Maroc connaît de profondes mutations économiques et politiques, ce qui donne lieu à une nouvelle cimenterie construite à Meknès, un investissement pris en charge directement par Lafarge via la société «Ciments Artificiels de Meknès >> (CADEM). En 1953, l'usine démarre avec un premier four rotatif en voie humide. Sa capacité de production s'élève à 120 000 tonnes de ciment par an. En 1969, la capacité de production du site s'élève à 389 000 tonnes grâce à l'inauguration du deuxième four de l'usine de Meknès.

L'usine Meknès est dotée des certificats de conformité aux normes **ISO 9001** de la gestion de la qualité, ainsi que la norme relative au management environnemental **ISO 14001**.

En raison du ralentissement de la demande nationale, un programme d'export de clinker depuis cette usine vers des pays d'Afrique a été lancé [1].

5. Organigramme

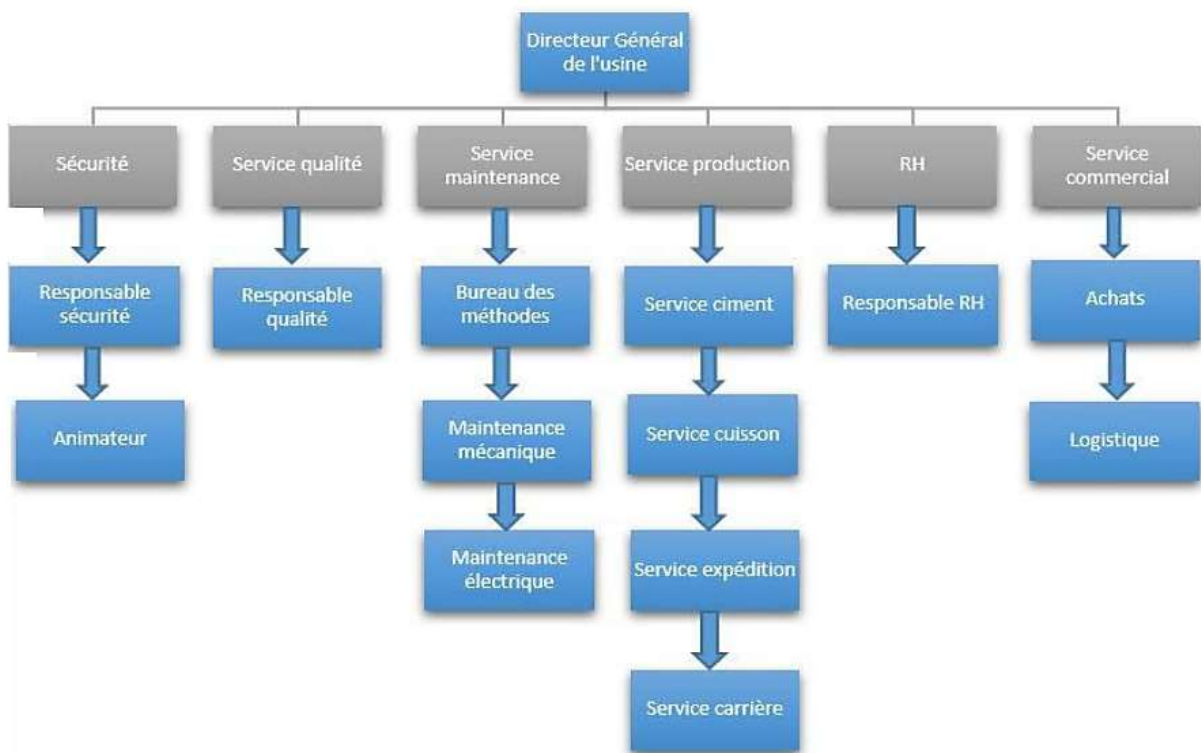


Figure 2: Organigramme de groupe LafargeHolcim Maroc

Chapitre 2 : définition et processus de fabrication de ciment

1. Définition et composition du ciment

Le ciment est un liant hydraulique, permet la mise au point d'une grande variété de produits répondant aux besoins en matériaux de construction. Par cohésion avec des sols ou des granulats, le ciment permet l'obtention de matériaux rigides et durs, aux performances mécaniques élevées.

Le ciment est une matière pulvérulente, il contient quatre constituants principaux :

Le silicate tricalcique, ou C_3S ($3 CaO, SiO_2$).

Le silicate bicalcique, ou C_2S ($2 CaO, SiO_2$).

L'aluminate tricalcique, ou C_3A ($3 CaO, Al_2O_3$).

L'alumino-ferrite tétracalcique, ou C_4AF ($4 CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3$).

Les 4 constituants minéraux de base : la chaux CaO (C), la silice SiO_2 (S), l'alumine Al_2O_3 (A), l'oxyde de fer Fe_2O_3 (F), ne se trouvent pas dans la nature dans des états adéquats favorisant l'émergence des liants hydrauliques. Ils doivent donc subir un traitement approprié (traitement thermique) pour les amener dans un état de réactivité.



Figure 3: Chaîne de transformation du calcaire et d'argile en ciment

L'usine de Meknès est spécialisée dans la fabrication des trois catégories de ciments, à savoir : **CPJ35**, **CPJ45** et **CPJ55**, qui se différencient selon des pourcentages précis des ajouts au clinker. (Calcaire et gypse), Les matières d'ajout sont :

- Le gypse : qui permet de régulariser le temps de prise du ciment. Le calcaire ajout qui diminue la résistance du ciment
- Le schiste : le gisement de schiste se situe à 20 Km de Sud-ouest de la ville Fès.
- Les matières de correction ajoutées à la matière cru, à savoir le sable et le minerais de fer. Leur coût est élevé car elles sont fournies par des fournisseurs étrangers.

2. Procédé de fabrication du ciment

La fabrication du ciment est un procédé complexe qui nécessite une maîtrise des outils et techniques de production et qui exige un contrôle de qualité à chaque étape de la fabrication afin d'obtenir un produit de bonne qualité qui puisse satisfaire aux exigences des clients et des parties prenantes, Notamment en ce qui concerne le respect de l'environnement.

Le processus de fabrication du ciment se décompose en 3 étapes essentielles à savoir :

- Préparation du cru.
- Cuisson de clinker.
- Elaboration du ciment.

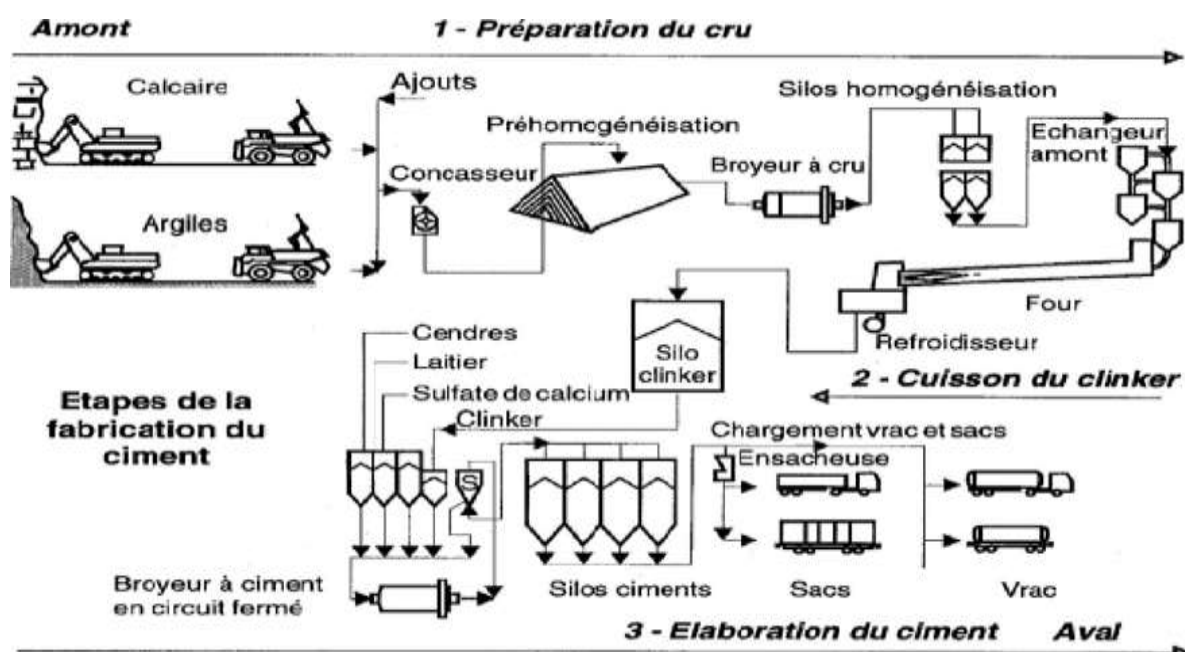


Figure 4: Flowsheet du processus de fabrication du ciment Portland.

2.1. Extraction des matières premières

Les matières premières (calcaire et argile) sont extraites des carrières à 5 Km de l'usine sur des fronts de 8 à 15m par abattage et tirs de mines. Les blocs obtenus qui peuvent atteindre 1m³ de volume sont réduits en fragments de faible dimension (25mm à 40mm), par un concasseur à marteaux (FCB) ou à mâchoire (HAZEMAG), la matière sortant du concasseur est acheminée vers un hall de stockage par un convoyeur à bande. Cette étape assure également un certain mélange des matières premières arrivant de la carrière.



Figure 5: Carrière d'usine de méknes

2.2. Pré-homogénéisation

Cette opération est réalisée par stockage des matières concassées dans un Hall en disposant la matière en couches horizontales superposées (tas en constitution) puis en les reprenant verticalement (tas en consommation) à l'aide d'une roue pelle.

2.3. Broyage « cru »

Avant le broyage on procède souvent des ajouts en constituants secondaires servant à corriger la composition : Minerai de fer (apport d'oxyde de fer), bauxite (apport d'alumine), schiste (silice), calcaire de correction. Qui sont mélangés avec des grains de calcaire et d'argile par broyage, dans des proportions définies, en un mélange très fin, le « cru ».

Un séparateur est prévu pour n'obtenir à la sortie que les fins particules le flux de gaz chaud permet de diminuer la trace d'humidité, la farine obtenue « Fines » est acheminée vers le silo farine .

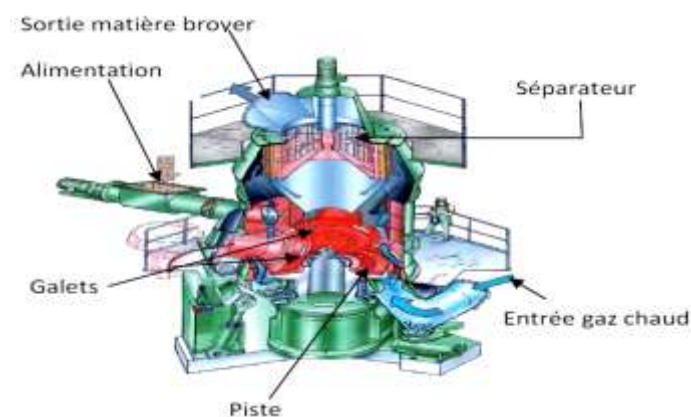


Figure 6: Broyeur cru verticale

2.4. Homogénéisation

Deux silos d'homogénéisation assurent le mélange et le stockage de la farine après broyage et avant cuisson. La farine est acheminée au silo d'homogénéisation par des aéroglisteurs. Le silo 1 a une capacité de 7500 tonnes, alors que le 2^{ème} a une capacité de 5000 tonnes, L'extraction de la farine se fait de trois points, et cela d'une manière cyclique.

2.5. Production de clinker

2.5.1. Préchauffage de la matière

L'opération commence par l'évaporation de l'eau à 100°C que le mélange cru contient et se poursuit par la décarbonatation (entre 650 et 900°C). Le préchauffage se fait dans une série de cyclones, disposés verticalement sur cinq étages appelé « préchauffeur ». La matière froide, introduite dans la partie supérieure, se réchauffe au contact des gaz. D'étage en étage elle arrive partiellement décarbonatée jusqu'à l'étage inférieur, à une température comprise entre 800°C et 1000°C.

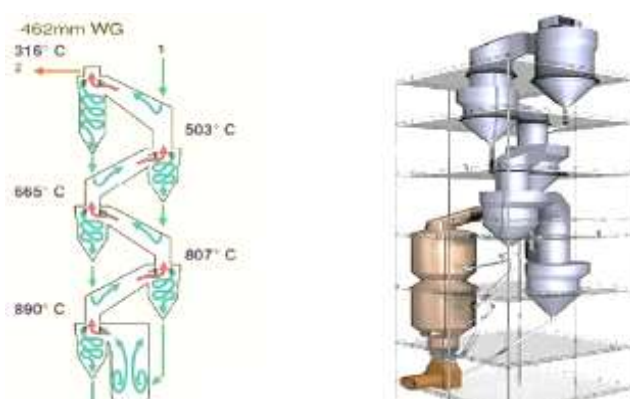
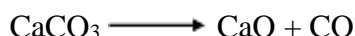
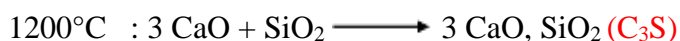


Figure 7: les cyclons de préchauffage

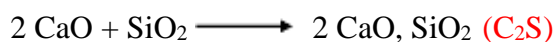
2.5.2. Cuisson

A la sortie de la tour, la matière pénètre à l'amont du four où s'effectue l'étape la plus importante de sa transformation et progresse jusqu'à la zone de clinkerisation (1200°C à 1450°C). Le four est caractérisé par une grande enceinte cylindrique rotative en acier (avec revêtement intérieur réfractaire) légèrement incliné et tournant de 1 à 3 tours/minute. Le temps de parcours est de l'ordre d'une heure. Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile, principalement composée de silice, d'alumine et d'oxydes de fer, se combinent à la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et des aluminates de calcium.

Le silicate tricalcique : ce composant donne de très bonnes résistances à court et à long terme, ainsi qu'une bonne aptitude au broyage.



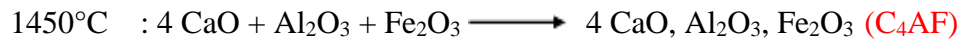
Le silicate bi-calcique : résistance initial moins élevée que C₃S, mais deviennent bonne à long terme, il est moins bon en terme d'aptitude au broyage que C₃S.



L'aluminate tricalcique : donne de très bonnes résistances initiales qui montent peu par la suite.



L'alumino-ferrite tétra-calcique : donne des résistances faibles et peu précisées. Le fer est responsable de la teinte grise du ciment.



En théorie, cette réaction s'arrête lorsqu'il n'y a plus de chaux disponible. Mais en Réalité il reste toujours de la chaux non combinée (chaux libre), dans la matière sortant du four est le clinker.



Figure 8: Four rotatif d'usine de Meknès

2.5.3. Refroidissement :

A la sortie du four, on prévoit un refroidisseur permettant :

- Refroidir le clinker qui sort du four jusqu'à une température de 80 °C.
- Récupérer le maximum de chaleur contenue dans le clinker.
- Protéger la matière en amont.

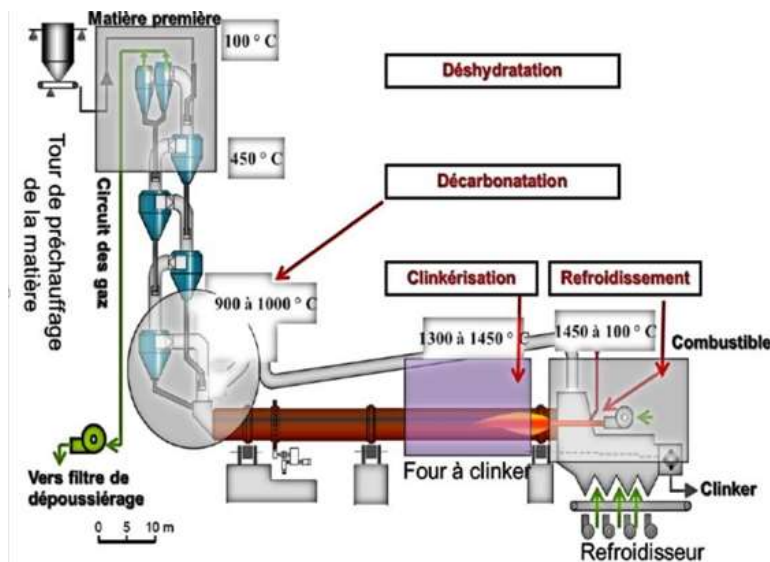


Figure 9: Etape de cuisson de clinker

2.6. Broyeur à boulets

Après le refroidissement, Dans un broyeur à boulets les granules de clinker sont broyées avec addition de gypse (3 à 5%). Cette addition a pour but de régulariser la prise du ciment, notamment de ceux qui contiennent des proportions importantes d'aluminate tricalcique.

Ce broyeur est constitué de deux compartiment séparé d'une grille ne laissant passer que les grains de taille inférieur à 8mm pour compartiment 1 et 10mm pour compartiment 2. Le ciment fini sort du broyeur est récupéré dans un séparateur à air installé derrière le broyeur. Le ciment est orienté vers les silos de stockage et de livraison par transport pneumatique ou mécanique.

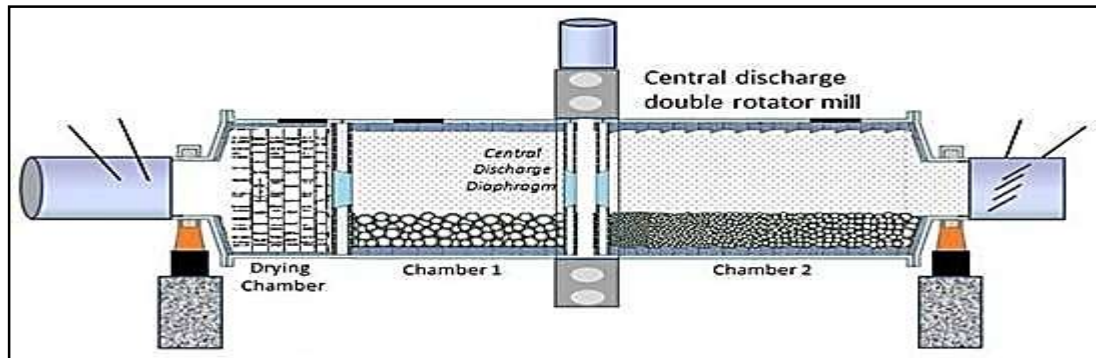


Figure 10: Schéma d'un broyeur à boulets avec ses parties principales

2.7. Stockage et expédition

Après sa fabrication, le ciment est acheminé par voies pneumatiques vers des silos de stockage dont la capacité est de plusieurs milliers de tonnes.

Il est expédié après vers les lieux de consommation sous 2 formes :

- ✚ En sacs : qui contiennent généralement 25 ou 50kg de ciment sur lesquels est marqué classe de résistance du ciment.
- ✚ En vrac : La livraison du ciment en vrac se fait sur des citernes. Le ciment est injecté avec l'air dans la citerne jusqu'à ce que le tonnage soit atteint.

CHAPITRE 3 : Qualité à LAFARGE Holcim usine de Meknès

Le présent chapitre nous permet de décrire la démarche de contrôle qualité adoptée par le service ainsi qu'une présentation des équipements du laboratoire de contrôle.

1. Introduction

Conformément aux normes françaises (ISO 9001) en vigueur relatives au ciment .la Direction LAFARGE Ciments Usine de Meknès s'engage à respecter ces textes. Ainsi, les rôles majeurs du service qualité sont :

- ✚ Observer toutes les spécifications des normes visant les produits fabriqués ;
- ✚ Veiller à l'application des mesures prises pour assurer la qualité des produits intermédiaires (cru, clinker, constituants ciments) ;
- ✚ Définir les dispositions et les contrôles nécessaires pour assurer la permanence de la qualité du matériel d'essais et la fiabilité des résultats ;
- ✚ Faciliter la tâche des agents de vérification dans l'exercice de leurs fonctions.

2. Analyses réalisées au laboratoire de LafargeHolcime Meknès

LAFARGE Ciments, Usine de Meknès est dotée d'un laboratoire équipé de tous les équipements nécessaires à la réalisation des contrôles depuis la réception des matières premières jusqu'aux expéditions du produit fini et ce conformément aux normes en vigueur et aux besoins de la clientèle. Le personnel de laboratoire ayant en charge le contrôle de la qualité est compétent et suit des formations continues en matière de contrôle de qualité et selon un planning de formation préétabli.

Les différentes analyses réalisées au laboratoire sont comme suivant :

- 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.

2.1. Essais chimiques :

Dans les essais chimiques on détermine :

- Les pourcentages des éléments du ciment qui sont : la silice SiO_2 , la chaux CaO , l'oxyde de fer Fe_2O_3 , l'alumine Al_2O_3 , la magnésie MgO , Trioxyde de soufre SO_3 , les alcalins : Na_2O , K_2O et Cl^- .

- La Perte au feu (PAF).
- Les Cendres, l'humidité.
- La chaux libre CaO (libre).
- le chlorure.

⇒ On détermine ces éléments par voie chimique classique ou par fluorescence des RX

2.1.1. Analyse par fluorescence X

Cette Méthode effectue l'analyse chimique par la diffraction des rayons X de l'appareille de spectrométrie de fluorescence X, suivant les informations programmées dans l'unité de pilotage et selon la nature de la matière de l'échantillon à analyser.

Pour faire les analyses par les RX on utilise soit les perles pour les cuits, soit les pastilles pour les non cuits.

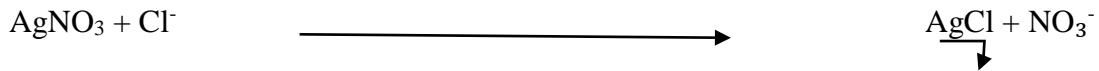
⇒ L'analyse chimique de la fluorescence X sert à déterminer les teneurs en éléments majeurs et mineurs dans un échantillon :

Elément majeurs : CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃.

Elément mineurs : MgO, K₂O, Na₂O, SO₃.

2.1.2. 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 :



La source de chlorures dans le clinker est le calcaire, l'argile, le petcoke, le fuel. Sa présence dans le ciment provoque la corrosion des armatures, et accélère l'hydratation.

Le Chlore est au-delà de son influence sur la qualité du ciment un ennemi du procédé de fabrication de clinker. Il a en effet la caractéristique d'être très volatile à des températures élevées

L'Usine analyse le Chlore et le Souffre dans la farine chaude à une fréquence journalière parce que la teneur à ce niveau est révélatrice du degré de recirculation des volatiles. Pour une teneur de 1.4% de SO₃ dans le clinker, on estime que l'on commence à avoir des problèmes de **bouchage** à partir de 3.5% de SO₃ dans la farine chaude



Figure 11: Titreur des ions en chlorures

2.1.3. Perte au feu

La perte au feu est une analyse permettant de déterminer la teneur en H₂O, CO₂ dégagé pendant la calcination. La perte au feu (PAF) dépend de la matière ajoutée. Quand l'ajout est le calcaire pur ; la perte au feu est plus importante. Par contre, quand l'ajout est le gypse comme ; la perte au feu est moins importante.

Cette analyse est réalisée dans un four à moufle à des températures spécifique dans un four d'une température de (950 C°).

Soient :

$$\% \text{ Perte au feu} = \frac{(m_t + m_i) - m_F}{m_i} \times 100$$

- m_t : Tare du creuset (g),
- m_i : Prise d'essai (g)

m_F : masse du creuset (g) + prise d'essai après calcination.

2.1.4. Dosage de la chaux libre

L'analyse de la chaux libre est une analyse primordiale de pour le pilotage de la cuisson – fabrication du clinker. En effet si la farine a été bien pilotée et a une composition chimique adéquate, la chaux libre est révélatrice de la qualité de la cuisson :

⇒ On détermine la teneur du clinker en chaux libre par deux méthodes, dosage par Acidimétrie et dosage par conductimétrie dans l'appareil ACMEL (voir partie modes opératoires).

Expression du résultat :

$$\% \text{CaO}(\text{libre}) = V_{\text{HCl}} (\text{ml}) \times 0,28$$

2.1.5. Détermination du taux d'humidité

L'humidité est la teneur en eau libre à 105°C d'une matière donnée, et cela consiste à peser un échantillon de masse initiale qu'ont séché à l'étuve et puis de peser sa masse finale.

- Peser à nouveau l'ensemble (bol + matière).

⇒ Résultats Soient :

$$\% \text{Taux d'humidité} = \frac{(m_t + m_i) - m_f}{m_i} * 100$$

- m_t : Tare du bol (g)
- m_i : Prise d'essai (100g).
- m_f : masse du bol (g) + prise d'essai après séchage.

2.2. Essais physiques et mécaniques

2.2.1. Analyse granulométrique

Cette étude consiste à déterminer le pourcentage des passants à des tamis de différentes ouvertures à l'aide d'un appareil ALPINE.



Figure 13: Tamiseur



Figure 12: Tamis avec différents diamètres 200 ; 90 ; 45 µm

Cette analyse est réalisée pour déterminer le pourcentage des refus de ciment après broyage. Ainsi les refus sont déterminés pour contrôler l'état de fonctionnement du broyeur et le degré de broyage.

Soient :

Avec m_1 : masse initial(g)

m_2 : masse après tamisage(g)

$$\% R = \frac{m_2 * 100}{m_1}$$

2.2.2. *Surface spécifique Blaine*

Le but de cette analyse est la détermination de la finesse du ciment ou bien le degré de broyage. Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm² /g).

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation sont élevée et plus ces résistances mécaniques à jeune âge sont grandes. L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture de ciment est appelé «Perméabilimètre de Blaine».



Figure 14: Perméabilimètre de Blaine

2.2.3. Gâchage

Le gâchage est une opération cruciale, qui permet de construire des éprouvettes afin de mener les essais mécaniques. Il consiste à mélanger le ciment, l'eau et le sable selon des proportions bien déterminées (malaxage) puis à remplir des moules (moulage) pour avoir des éprouvettes de dimension (4x 4 x16 cm³) qui serviront aux essais de flexion et compression.

- Pour malaxer le ciment, il faut mettre 225g d'eau distillée et 450g de ciment conditionné à 20°C dans le récipient du malaxeur pour ensuite mettre l'appareil en route et la faire tourner à vitesse lente pendant 90s. Une addition automatique de 1350g de sable est faite pendant les 30 dernières secondes.

A la fin il faudra démonter le batteur de son axe et vider le récipient du mortier pour procéder immédiatement au moulage.

-concernant le remplissage des moules (moulage) est de diviser le portier en 6 parties afin de l'introduire dans les trois cases du moule. On introduit la première couche dans chaque compartiment du moule. On les étale à l'aide d'une grande spatule tenue verticalement. Ensuite, on serre la première couche de mortier par 60 chocs et on introduit la seconde couche de mortier qui sera nivelée avec la petite spatule et serrée à nouveau par 60 chocs. Les éprouvettes sont testées à différents âges : 1 jour, 2 jours, 7 jours et 28 jours. Chaque échantillon nécessite 9 éprouvettes vu que les essais mécaniques sont de type destructif. A l'âge requis, chaque éprouvette est retirée de son milieu de conservation humide, elle est brisée en deux moitiés par flexion et chaque moitié est soumise à l'essai de compression.

2.2.4. Résistance à la flexion et à la compression

Objectif :

Ils ont pour but de mesurer les résistances aux différentes contraintes au bout d'un certain temps.

Principe :

Les essais de flexion et de compression permettent de déterminer la contrainte de rupture à la traction par flexion et la contrainte de rupture à la compression des liants hydrauliques (Ciment).

Compression :

Cet essai se ramène à la mesure de la résistance des demi-prismes à une compression sur sa face latérale de moulage (8 * 4cm²)

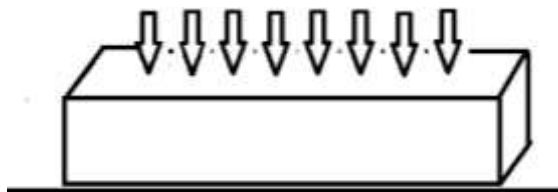


Figure 15: schéma présentation des forces exercées par compression

Flexion :

Consiste à placer le prisme dans un dispositif de flexion avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinale perpendiculaire à ceux-ci. On applique en suite la charge verticalement par le rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme, l'appareil à flexion qui affiche directement la valeur de la résistance en MP

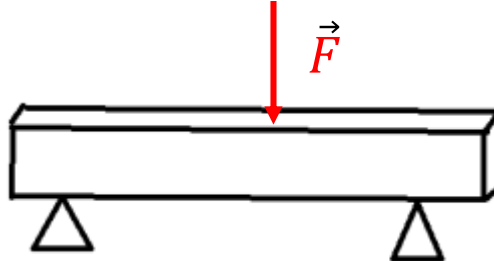


Figure 16:schéma présentatif des force exercé par flexion

2.2.5. Mesure du Temps de début de prise et de fin de prise

Cette méthode est pour la détermination du temps de prise du ciment,

Principe :

On détermine le début de prise ou fin de prise à l'aide de l'aiguille de Vicat qui s'enfonce dans un moule rempli de pate

Mode opératoire

On pèse 500 g de ciment, on verse dans un récipient de malaxeur, puis on ajout d'eau préalablement déterminée par des tâtonnements successifs de manière à réaliser la consistance normale.

3. Indices cimentiers

Le mélange des différentes matières premières est déterminé de façon à respecter les moyennes mensuelles des modules suivants calculés sur la farine alimentant le four.

S, A, F et C représentent les masses ou les pourcentages de chaque composé dans le cru.

Avec le

S : SiO_2 la silice

A : alumine Al_2O_3

F : oxyde de fer Fe_2O_3

C : carbonate de calcium CaCO_3

3.1.Les minéraux de bogue

La composition minéralogique approximative du clinker a été déterminée à partir des formules de BOGUE.

- Le silicate tricalcique (3CaO , SiO_2) : **C_3S Alite**

- Le silicate bicalcique (2CaO, SiO₂) : **C₂S Bélite**
- L'aluminate tricalcique (3CaO, Al₂O₃) : **C₃A Céliste**
- L'alumino-ferrite tétracalcique(4CaO, Al₂O₃,Fe₂O₃) : **C₄AF Féliste**

3.2. Indice de déficience en chaux Δ

Pour produire les minéraux nécessaires il faut une quantité de chaux nécessaire calculée par la formule suivante :

$$C_{th} = 2,8 S + 1,65 A + 0,35 F$$

Ce calcul correspond à des conditions de cuisson idéales. Alors qu'en réalité on utilise une quantité de chaux inférieure à celle théorique.

La déficience en chaux du cru : $DC = 2,8 S + 1,65 A + 0,35 F - C$

L'indice Δ correspond à une normalisation de cette expression :

$$\Delta = \frac{2,8 S + 1,65 A + 0,35 F}{2,8 S + 1,65 A + 0,35 F - C} * 100$$

Pour maîtriser le rapport C₂S/C₃S, il faut limiter la valeur Δ entre 3% et 7%.

3.3. Module LSF (Facteur de saturation en chaux)

Le dénominateur est une cible nominale utilisée pour déterminer le pourcentage de la chaux libre demandée pour obtenir une production d'une qualité bien déterminée.

$$LSF = \frac{\text{Chaux libre pratique}}{\text{Chaux libre théorique}} * 100$$

- ⇒ Pour un ciment "normal": LSF = 90-95
- ⇒ Pour un ciment "supérieur" : LSF = 95-98
- ⇒ Si LSF < 90%, le cru est sous dosé en chaux.

3.4. Module KST (Standard de chaux)

La quantité de de chaux disponible dans le cru (Cr) devait être légèrement inférieure à la valeur de la chaux théorique. Mais pour tenir compte de la disponibilité de la chaux pour former C₃S, on utilise l'indice KST :

$$KST = \frac{Cr}{2,8 S + 1,1 A + 0,7 F} * 100$$

- ⇒ La valeur du KST doit être limitée entre : $95 < KST < 100$

3.5. Module Silicique (MS)

Cet indice est un indicateur de la facilité de cuisson. Les fondants déterminent la quantité de produit entrant en phase liquide lors de la cuisson.

$$MS = \frac{S}{A+F}$$

MS ↘ → C₃A + C₄AF ↗ → Pourcentage de phase liquide ↗ → Temps de cuisson ↘
⇒ Formation de C₂S et C₃S plus facile → Cuisson plus facile.
⇒ 2,2 < MS < 3,2

Au moins 2,2 pour avoir suffisamment de C₂S et de C₃S par rapport aux fondants, et avoir des bonnes résistances mécaniques.

Au plus 3,2 pour avoir une quantité minimale suffisante de fondants (phase liquide).

3.6. Module Alumino-ferrique (MAF)

Ce module règle la proportion massique entre C₃A et C₄AF. A est consommé pour former en priorité C₄AF, alors le C₃A se forme avec l'alumine restante. S'il y a plus de moles de F que celles de A, il ne restera plus de A pour former C₃A.

$$\text{MAF} = \frac{A}{F}$$

On maintient le module alumino-ferrique dans la plage : 1 < MAF < 2,5

3.7. Pourcentage de carbonate

En l'absence de moyens d'analyse permettant de calculer le Δ, le LSF ou le KST, on utilise le titre.

C'est un pourcentage de carbonates « CaCO₃ + MgCO₃ (proportion négligeable) » présents dans le cru.

77,5% < Pourcentage de carbonate < 79,5%

Il permet d'estimer le surdosage ou le sous-dosage du cru. Il ne tient pas compte de la chaux (CaO) non carbonatée présente dans le cru. Il ignore les fondants.

Partie 2 :

Optimisation de pourcentage de gypse dans le ciment

CPJ45

Introduction

Lorsque le clinker de ciment est broyé pour donner un produit de granulométrie inférieure à 45 µm, le produit s'appellera alors ciment. Le mélange du produit de ciment avec de l'eau donnera une pâte de ciment. Cette pâte commencera à durcir immédiatement ; le moment où le ciment est devenu dur est appelé temps de prise initiale. Ce temps est généralement très court pour l'opération de bétonnage, c.-à-d. transport et remplacement du mélange. Par conséquent, certains minéraux sont ajoutés au clinker

Lors le broyage de clinker pour prolonger le temps de prise, Le gypse brut est toujours candidat, utilisé comme ajout car il est moins cher et très doux. En plus du gypse réagira avec le minéral d'aluminate tricalcique (C₃A) qui est le composé principalement responsable du temps de prise précoce du ciment. La réaction du gypse avec (C₃A) retardera le temps de prise du ciment (c'est-à-dire prolongera le temps de prise) qui est nécessaire pour que les opérations de bétonnage se déroulent parfaitement, si la quantité de gypse est petite le temps de prise sera court, cependant, ajouter une grande quantité de gypse au clinker, Pendant son broyage retardera le durcissement de la pâte de ciment et produira une grande quantité de Chaleur pendant la réaction et la solidification du béton. Par conséquent, la quantité de gypse doit être contrôlée pour obtenir le temps de prise approprié et diminuer le pourcentage de SO₃ dans le béton et pour éviter la corrosion de l'acier et la déformation de la structure du béton.

Donc dans ce chapitre, après une étude bibliographique sur le gypsage, nous avons essayé de chercher l'optimum de gypse qu'il faut ajoutée au ciment portland de qualité CPG 45.

Cette procédure nommée « le gypsage optimum » ou « l'Optimisation de pourcentage de gypse dans le ciment » se fait par l'équipe du laboratoire de lafargeHolcim Meknès chaque année. En suivant une procédure nommé « la méthode directe ». Donc dans ce Rapport, je traiterai cette procédure que j'aborderai dans la 2^{ème} chapitre, et je terminerai cette méthode par un plan de mélange à l'aide de logiciel Nemrodw.

Chapitre1 : généralités sur le gypsage optimum

1. Mécanisme d'hydratation du ciment portland

L'hydratation du ciment regroupe l'ensemble des réactions chimiques complexes qui se produisent entre le ciment et l'eau dès leur mise en contact. Toutes ces réactions conduisent à la formation de silicates ou d'aluminates calciques hydratés qui font prise et qui donnent les propriétés mécaniques aux pâtes de ciment, des mortiers et des bétons. Ces caractéristiques dépendent essentiellement de la nature des composants et de leurs quantités respectives.

Lorsque le ciment entre en contact avec l'eau, une réaction exothermique instantanée se produit avec un fort dégagement de chaleur, cette période de "pré-induction" est de courte durée. Elle est suivie d'une période de relative inactivité appelée "**période dormante**" au cours de laquelle le dégagement de chaleur est faible mais pas nul ; La durée de cette période varie entre 2 et 8 heures.

La période dormante est très importante quant à l'ouvrabilité (maniabilité) des bétons et mortiers car à la fin de cette période s'amorce la prise du ciment. Une forte libération de chaleur (2ème pic) suit la fin de la période dormante et correspond à la "période d'accélération" associée au début de prise et de durcissement du ciment. Certains ciments montrent un (3ème pic) après 20 heures d'hydratation. La plupart des chercheurs sont d'accord sur la période de pré-induction, mais les échanges réactionnels qui s'effectuent pendant la période dormante, de même que la cause de la fin de cette période est toujours sujette à controverses [5].

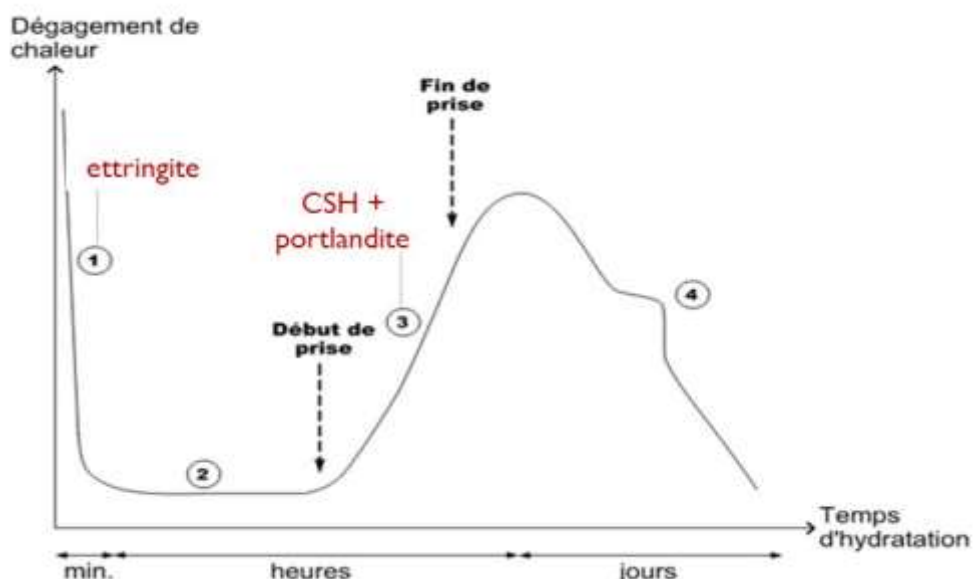


Figure 17: dégagement de chaleur en fonction de Temps d'hydratation

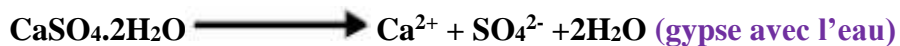
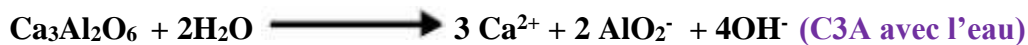
2. Rôle de l'ajout de gypse sur l'hydratation de ciment

Le ciment portland majoritairement composés des phases silicates et des aluminates :

- ✚ Silicate tricalcique C₃S
- ✚ Silicate Bicalcique C₂S
- ✚ Aluminate tricalcique C₃A
- ✚ Alumino ferrite tétracalcique C₄AF

Ces 4 composés forment le clinker, l'aluminate tricalcique est le composé le plus réactif avec l'eau. Grace à ça l'usine ajoute le gypse au clinker pour contrôler ces réactions. Ce gypse réagit avec les aluminates pour former des hydrates de sulfoaluminate de calcium : le trisulfoaluminate de calcium, aussi connu sous le nom d'ettringite et le monosulfoaluminate de calcium.

Phase initiale : C₃A et le gypse vont se désoudre dans l'eau :



Ensuite ces ions réagissant ensemble pour former des cristaux de trisulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite).

- **Formation d'ettringite** : Les aluminates réagissent avec le sulfate du gypse pour former de l'ettringite (trisulfoaluminate de calcium hydraté) :



Avec: C: Ca²⁺ ; S: SO₄²⁻ ; H: H₂O ;

Cette réaction est fortement exothermique. Une couche d'hydrates vient entourer les aluminates qui forment alors une couche protectrice autour du grain.

- **Transformation de l'ettringite en monosulfate de calcium hydraté** : Lorsque le gypse est épuisé, la concentration en sulfates de la solution baisse. L'ettringite devient alors instable et se dissout pour former du monosulfate de calcium hydraté. Les réactions chimiques s'intensifient.



Hydratation des aluminates résiduels : Au bout de quelques semaines, en général, l'ettringite se transforme totalement en monosulfo-aluminate. Au-delà d'un mois, les réactions se poursuivent lentement avec l'aluminate (C₃A) et l'aluminoferrite (C₄AF) pour former de l'aluminoferrite de calcium hydraté. Même si les séquences réactionnelles sont proches du C₃A, l'aluminoferrite tétracalcique (C₄AF) est nettement plus lent à réagir et n'apparaît de manière significative qu'une fois que le gypse est totalement épuisé.

Alors le choix de l'optimum de sulfate est un compromis pour de bonnes propriétés mécanique de 1 à 28 jours[4].

le gypsage optimum :

Le choix de l'optimum de sulfatage est un compromis pour de bonnes propriétés mécanique à 1 jour et à 28 jours. Diverses études ont été réalisées pour tenter de déterminer les origines de l'optimum de sulfatage. L'optimum de sulfatage est le résultat de deux hypothèses un effet cinétique ou à un effet microstructural.

- Dans le cas où la quantité de sulfate introduite dans le système est **supérieure à la quantité optimale**, on dit que le système est sur sulfaté, le système ne bénéficiant pas de la thermo – activation due à la simultanéité des phénomènes décrit plus haut, se retrouverait avec un avancement plus faible et par conséquent une quantité hydratés précipitée moindre et des **résistances plus faibles**. [6]

- Dans le cas où la quantité de sulfate introduite dans le système **est inférieure à la quantité optimale**, on dit que de calcium intervient avant le pic d'accélération de l'hydratation de l'alite, **la pâte se raidit et n'est plus malléable**, l'ajout de sulfate de calcium permet de rendre la pâte malléable. [6]

Tableau 1: Résumé sur l'hypothèse microstructure de gypsage optimum

SO3 < Optimum	SO3 = Optimum	SO3 > Optimum
Vettringite < Vporeux C-S-H	Vettringite = Vporeux C-S-H Formé à une échéance	Vettringite > Vporeux C-S-H Formé à une échéance
Espaces vides diminuent les Résistances mécaniques	Les résistances mécaniques Sont maximales	Les microfissures altèrent les Résistances

3. Facteurs affectant les résistances de ciments

Afin de mener une étude efficace, nous avons choisi de l'ensemble des causes qui influencent le plus sur la résistance à la compression du ciment type CPJ45 en les regroupant selon 3 catégories :

- Causes à l'origine de clinker.
- Causes à l'origine de broyage.
- Causes à l'origine de gypse

3.1. Teneur en CAO « Cuisson de la matière »

La chaux libre est un facteur défavorable pour le développement des résistances, une augmentation de la chaux libre est le signe d'une dégradation de la qualité de cuisson,

Mauvaise cuisson de clinker défavorise la combinaison entre la chaux avec les oxydes minéraux (SiO_2 ; Al_2O_3 ; Fe_2O_3)

3.2. Finesse

La finesse de mouture n'a pas été régulière d'un ciment à l'autre. Cette finesse a alors été définie par la surface spécifique Blaine et le refus à 40 μm , Quand la taille des particules est plus grande, elles nécessitent plus d'efforts pour le broyage et un débit plus bas, plus les particules de ciment est très fins plus ils donnent des bonnes résistances.

3.3. Teneur en C3S dans le clinker

Le C3S est favorable au développement des résistances finales, donc une augmentation du C3S conduit à une augmentation parallèle de Résistance de ciment

3.4. «SO3 » Composé principale de gypse :

Qui joue le rôle d'un régulateur de prise qui retarde la formation d'aluminate de calcium hydraté en donnant d'abord du trisulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite). Cette ettringite, dite primaire, ne provoque pas de gonflement car elle cristallise avant le durcissement du béton, dans les espaces libres du matériau. Ces cristaux d'ettringite ont même un caractère bénéfique, puisqu'ils contribuent à la cohésion de la pâte de ciment au jeune âge leur formation diminue sa porosité et contribue à l'augmentation de sa résistance mécanique(voir tableau 1).

Chapitre 2 : Méthode directe de gypsage optimum

1. Objectif

Cette étude a pour objectif de substituer un ciment CPJ 45 en changeant le % de gypse en respectant la limite des spécifications de la norme 10.1.005.

L'idée est de tester le comportement des ciments en termes de résistances à des niveaux d'addition de gypse élevés pour améliorer les couts et les résistances des ciments fabriqués.

2. Type de qualité du ciment :

L'usine de Meknès se caractérise par la qualité de ciment qu'il fabrique et cela selon les besoin des clients et les matières qui sont disponibles. Il existe plusieurs qualités du ciment qui sont :

Tableau 2: Type de qualité du ciment

	CPJ35	CPJ45	CPJ55
clinker	70%	70 %	76%
calcaire	30%	25%	19%
gypse	-	5%	5%
totale	100	100	100

3. Représentation générale de matières utilisées pour cette méthode :

3.1 Clinker :

Le clinker est un produit artificiel obtenu par la cuisson de la farine crue (Calcaire ; Argile) dans un four rotatif. La production du clinker se fait en quatre étapes :

- **Le séchage et le préchauffage de la farine crue.**
- **La décarbonatation partielle de la farine crue.**
- **La clinkérisation.**
- **Le refroidissement du clinker.**

Ainsi les phases majeures du clinker sont notées : C_4AF , C_3A , C_2S , C_3S

- C_3S et C_2S : a un effet sur la résistance initiale et finale et sur la durabilité.
- C_3A : effet sur le besoin d'eau et sur le temps de prise et sur la résistance finale et la durabilité et plus sur la résistance initiale.
- C_4AF : effet sur la résistance initiale et finale.

3.2. Gypse :

Le Gypse est une matière première acheté et reçu à l'usine à l'état brut puis concassé dans le concasseur principale puis stocké dans le silo d'ajout gypse. Le gypse c'est une substance blanche

utilisée en cimenterie comme retardateur de prise du ciment. Elle est composée principalement du minéral gypse, un sulfate doublement hydraté de calcium. Ce dernier décrit par la formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. La teneur en SO_3 est au moins $> 30\%$.

3.2. Calcaire :

Extrait de la carrière de l'usine, est concassé au concasseur principal puis stocké dans le silo d'ajout calcaire. Titre en calcaire : $\text{CaCO}_3 > 70\%$ en masse.

4. Analyse des matières premières et les ajouts par le spectromètre de fluorescence des rayons X (RFX) :

4.1. Sources des oxydes minéraux dans les matières premières et les ajouts :

Les tableaux suivants de tab 3 à tab 5 : présentent un suivi des analyses des matières premières et les ajouts au cours du temps par l'appareil FRX « préparation des perles » :

Analyse de calcaire :

Tableau 3: Table d'analyse de calcaire

date	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	TiO ₂	P ₂ O ₅	Mn ₂ O ₅
8.02.2019	4,25	1,54	0,91	59,73	1,7	0,12	0,3	0,00	0,00	0,10	0,03	0,04
18.03.2019	5,13	1,74	1,02	58,13	1,95	0,12	0,31	0,00	0,00	0,12	0,04	0,05
18.02.2020	5,11	1,48	1,84	62,2	2,23	0,12	0,31	0,00	0,00	0,13	0,05	0,04
2.04.2020	5,11	1,37	1,84	65,2	1,59	0,1	0,31	0,00	0,00	0,11	0,06	0,03
9.04.2020	7,49	2,4	1,26	61,4	1,4	0,08	0,33	0,00	0,00	0,10	0,05	0,04
16.04.2020	9,23	2,93	1,56	60,58	1,57	0,1	0,3	0,00	0,00	0,12	0,06	0,05
22.04.2020	5,28	1,76	1,01	65,3	1,3	0,21	0,3	0,00	0,00	0,14	0,06	0,04
07.05.2020	9,78	1,91	1,26	63,76	1,23	0,24	0,3	0,00	0,00	0,11	0,04	0,04
moyen	6,42	1,89	1,33	62,03	1,62	0,13	0,30	0,00	0,00	0,116	0,049	0,041

Analyse de l'argile :

Tableau 4: Table d'analyse de l'argile

DATE	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	TiO ₂	P ₂ O ₅	Mn ₂ O ₅
1.07.2020	49,85	9,2	6,65	20,01	2,44	0,35	1,54	0,00	0,00	0,001	0,001	0,002
19.08.2020	46,13	9,39	6,66	19,16	2,47	0,09	1,68	0,00	0,00	0,002	0,001	0,001
15.10.2020	48,7	12,5	7,61	12,31	2,34	0,06	2,08	0,00	0,00	0,002	0,001	0,002
08.04.2021	47,6	6,94	6,01	24,4	2,26	0,31	1,05	0,00	0,00	0,002	0,002	0,001
05.04.2020	48,87	10,27	4,6	19,72	2,71	0,08	2,67	0,00	0,00	0,002	0,002	0,002
22.04.2020	46,59	12,3	7,54	14,44	2,5	0,15	2,13	0,00	0,00	0,001	0,002	0,002
04.05.2020	48,3	11,06	7,23	15,36	2,56	0,77	2,91	0,00	0,00	0,002	0,001	0,002
07.05.2020	47,33	13,27	7,7	10,55	2,29	0,06	2,24	0,00	0,00	0,002	0,002	0,002

18.05.2021	48,89	8,65	6,14	21,18	2,23	0,11	1,52	0,00	0,0	0,00	0,00	0,002
26.05.2021	49,92	7,87	6,34	25,84	2,49	0,56	1,33	0,00	0,0	0,00	0,00	0,002
moyen	48,218	10,145	6,648	18,297	2,429	0,254	1,915	0	0	0,002	0,001	0,002

Analyse de gypse :

Le tableau suivant montre les Résultats des analyses de FRX sur des échantillons de Gypse dans des dates différents :

Tableau 5: Table d'analyse de gypse

date	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻	TiO ₂	P ₂ O ₅	Mn ₂ O ₅
30.03.2021	8,39	3,21	2,1	30	2,15	30,05	0,93	0,01	0,012	0,03	0,06	0,02
01.04.2021	5,88	1,8	1,15	30,25	3,4	33,58	0,72	0,00	0,0198	0,00	0,10	0,02
06.04.2021	7,9	2,66	1,15	30,88	2,1	30,87	0,85	0,00	0,012	0,02	0,06	0,02
16.04.2021	10,02	2,55	1,2	31,3	1,4	30,22	0,68	0,00	0,0135	0	0,05	0,02
22.04.2021	6,2	1,65	0,94	29,99	3,64	30,25	0,96	0,00	0,0225	0,03	0,05	0,02
12.05.2021	9,12	2,98	1,99	28,88	2,78	29,74	0,79	0,00	0,0188	0,02	0,06	0,02
20.05.2021	3,99	1,68	0,99	31	1,66	37,52	0,98	0,00	0,0115	0,03	0,05	0,02
01.06.2021	9	3,44	2	30,18	2,12	29,88	0,86	0,00	0,0144	0,01	0,06	0,02
moyen	7,563	2,496	1,440	30,310	2,406	31,514	0,85	0,001	0,016	0,018	0,061	0,020

Le tableau suivant donne le moyen de ces analyses :

Le tableau suivant montre les moyennes de toutes les résultats

Tableau 6 : Table d'analyse des matières premières et les ajouts en termes de moyen

	Moyen											
compose	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	TiO ₂	P ₂ O ₅	Mn ₂ O ₅
calcaire	6,423	1,891	1,337	62,040	1,621	0,136	0,308	0,000	0,000	0,116	0,049	0,041
argile	48,218	10,145	6,648	18,297	2,429	0,254	1,915	0,000	0,000	0,002	0,001	0,002
gypse	7,563	2,496	1,440	30,310	2,406	31,514	0,859	0,001	0,016	0,018	0,061	0,020

La représentation graphique des résultats d'analyses se fait par un logiciel spécifique pour les analyses multivariées appelé « The Unscrambler » caractérisé par plusieurs fonctionnements, parmi elles ; une projection des individus sur les variables par un graphe de **scores** et de **loadings**.

L'ACP sert à décrire un jeu de données comportant de nombreux individus et variables quantitatives. L'analyse permet d'extraire l'information pertinente et la synthétise sous forme de composantes principales, nouveaux axes pour décrire le jeu de données.

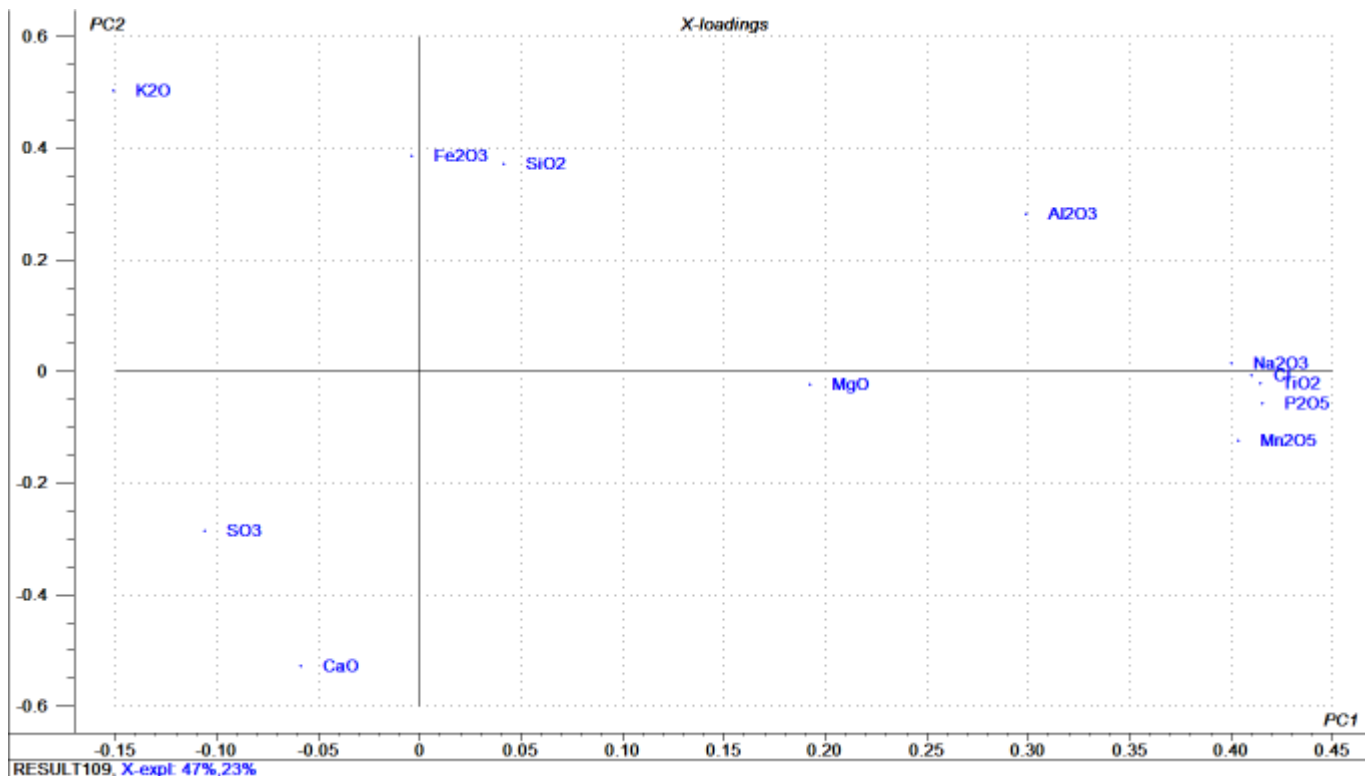


Figure 19: Représentation des variables dans l'espace individus (X-loadings).

4.2. Représentation graphique des résultats par The Unscrambler

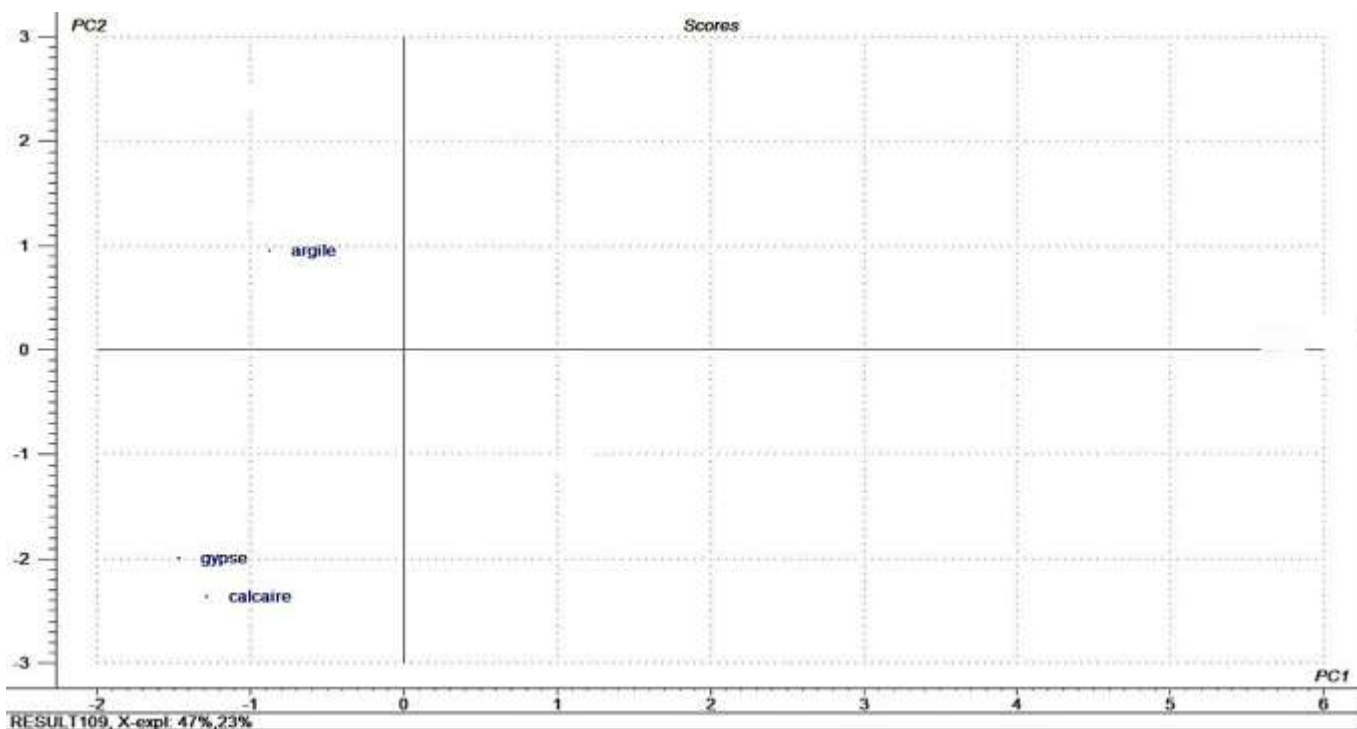


Figure 18: Représentation des individus dans l'espace des variables (Scores)

✚ A partir de ces deux représentations on voit que la variabilité expliquée par les deux 1^{ers} composants principale est supérieure à 90%, alors elles nous donnent de bonnes estimations,

✚ L'ACP sur les analyses des matières premières permet de identifier les variables « les oxydes » en 3 catégories bien séparés.

✚ Si on fait une projection de graphe des individus sur le graphe des variables, on peut conclure que le gypse est une source de SO₃, le calcaire est une source de CaO, et l'argile est une source de K₂O, Fe₂O₃ et SiO₂.

5. Méthode directe de gypsage

5.1. Principe

L'essai d'optimisation de gypse à l'échelle industrielle est effectué pendant 2-3 heures. Les étapes principales sont illustrées ci-dessus :

- **Etape 1** : Stabilisez la production normale sur le %SO₃ et la finesse cible. (2 échantillons consécutifs auront le même %SO₃ et finesse).

- **Etape 2** : Augmentez le dosage du gypse pour atteindre le maximum de SO₃ au cours d'une courte période.

- **Etape 3** : Diminuez le dosage de gypse du maximum au minimum du SO₃. L'échantillonnage devra se faire sur une courte période et à haute fréquence (chaque 5 min).

- **Etape 4** : Rétablir les conditions normales pour la production.[2]

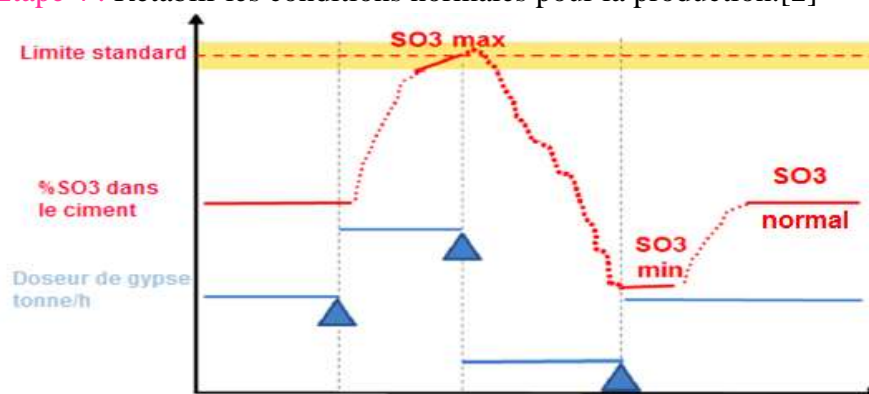


Figure 20: limite maximale et minimale de doseur de gypse au cours de procédures de gypsage optimum

5.2. Calcul de la recette de gypsage et du point de consigne par Excel :

Tous les composants (clinker, calcaire) autres que le gypse sont proportionnellement ajustés car les points de consigne des doseurs sont fixés au cours de l'essai, à l'exception de doseur de gypse.

On peut estimer les points de consigne X_{max} de gypse et X_{min} de gypse respectivement pour les teneurs maximales et minimales en SO₃.

$$X_{\max} = X_{\text{start}} * \left(\frac{\text{Clinker}\%}{\text{Gypse}\%} \right)_{\text{départ}} / \left(\frac{\text{Clinker}\%}{\text{Gypse}\%} \right)_{\text{max}}$$

$$X_{min} = X_{start} * \left(\frac{Clinker\%}{Gypse\%}\right)_{départ} / \left(\frac{Clinker\%}{Gypse\%}\right)_{min}$$

- Xstart est le point de consigne de gypse pour une production normale. Le rapport $\left(\frac{Clinker\%}{Gypse\%}\right)_{départ}$ correspond à la production régulière.
- Xmax et Xmin sont calculées par Excel en utilisant les formules précédentes.[2]

Tableau 7: Production régulière (recette connue)

	Recette%	SO3%		
Clinker	63,50	1,52		
gypse	4,30	39,17	Xstart	4,3
calcaire	32,20	0,12		
Ciment	100,00	2,69		

- la première colonne de ce tableau montre la recette de ciment cpj45 quotidienne utilisé dans l'usine est comme suit : « Clinker 63.5%, gypse 4.3%, calcaire32.2% »
- la deuxième colonne donne le % de SO₃ pour chaque composé au totale on a 2,69% de SO₃.
- Xstart= 4,3

Tableau 8: Essai avec un maximum de SO₃ (recette ajustée)

	Recette%	SO3%		
Clinker	61,22	1,52	Fixé	
Gypse	7.74	39,17	Xmax	8,0
calcaire	31,04	0,12		
Ciment	100,00	4,00		

- $x_{max} = X_{star} (4.3) \times \left(\frac{63.5}{\frac{4.3}{\frac{61.22}{7.74}}}\right) = 8.03 \cong 8$
- La nouvelle recette « 61.22%CK, 7.74%gypse, 31.04%calcaire », est calculé par des formules automatique à Excel qui visent à maximiser le gypse, tout en gardant le totale de %SO₃ conforme à la norme c'est-à-dire inférieur ou égale le 4%. Xmax =8.

Tableau 9: ajusté la recette de ciment par le minimum de %SO₃

	Recette%	SO ₃ %		
Clinker	65,57	1,52	Fixé	
Gypse	1,18	39,17	Xmin	1,1
calcaire	33,25	0,12		
Ciment	100,00	1,50		

- $xmin = Xstar \times \frac{\left(\frac{63.5}{4.3}\right)}{\left(\frac{65.57}{1.18}\right)}$

- Cette fois la recette est « 65.57%CK, 1.1%gypse, 33.25%calcaire », est calculé par des formules automatiques introduites sur Excel qui visent à minimiser le gypse, tout en gardant le totale de %SO₃ conforme à la norme c'est-à-dire supérieur à 1%.

- Xmin=1.

5.3. Echantillonnage

Le tableau suivant indique la méthode d'échantillonnage et aux façons dont elle effectuée suivant les étapes que nous avons déjà cités avant dans la partie Principe:

Tableau 10: Echantillonnage de l'essai

La durée de l'étape (min)	Etape 1 Avant l'essai	Etape 2 0 - 60	Etape 3 60 - 120	Etape 4 120 - 150	>150
Réglages du doseur de gypse	Ajusté au SO ₃ cible	Max	Min	Ajusté à la cible	Ajusté à la cible
Echantillonnage	Routine	10 min	5 min	10 min	Routine
Point de consigne du séparateur	Ajusté à la finesse	Pas de modifications		Ajusté à la finesse	

L'essai consiste à faire des prélèvements, en continu sur un intervalle de 5 min, du ciment en variant le pourcentage du gypse du maximum au minimum. Sur tous les échantillons prélevés on va réaliser des analyses chimiques et des essais mécaniques afin de tracer une courbe de l'évolution de la résistance et le temps de prise en fonction de la variation du SO₃ (l'élément majeur du gypse). Ces courbes vont nous permettre de déterminer le pourcentage optimal du gypse pour les deux paramètres.[2]

5.4. Réalisation des essais

Préparatifs :

- Préparer un stock suffisant et homogène du clinker, calcaire et gypse.
- S'assurer de la stabilité des doseurs (clinker, gypse, calcaire et adjuvant).
- Poster un préposé à la plateforme des doseurs afin d'éviter les marches à vide.
- Le broyeur destiné à l'essai c'est le BK5.

Mode opératoire :

- Au début de l'essai on a démarré le broyeur avec la composition actuelle du ciment CPJ 45 (63.5% CK - 4.3% gypse-32.2%calcaire).

- Ne démarrer l'essai que lorsque le broyeur est en marche stable (2h de marche). En fin d'essai il faut revenir à la consigne de départ.

- Il faut atteindre une cible de refus à 45 μm **8,5% +/- 0.5**

L'essai est réalisé en 2 étapes, le pourcentage du gypse est augmenté dans un premier temps à **8%** puis le baissé à **1%**. Le %SO₃ du ciment varie entre **1.50** et **4%**.

Le 1% et le 8% sont

Les conditions de la réussite de l'essai :

- Marche stable du Broyeur (Processus et Qualité)
- Prélèvements des échantillons des matières premières (gypse-calcaire et clinker) au début et à la fin de l'essai
- Augmenter le réglage du doseur gypse : Adopté **8.00 %** (le % SO₃ a la limite sup).
- Prélever des échantillons instantanés de 5 kg toutes les 10 min pendant 1h (identifier précisément les échantillons).
- Diminuer le réglage du doseur gypse : Adopter **1%**
- Prélever des échantillons instantanés de 5 kg toutes les 5 min pendant 1h (identifier précisément les échantillons).
- Changer le % du gypse afin de retourner à l'état normal (Consigne du %SO₃).
- Prélever des échantillons instantanés de 5 kg toutes les 5 min pendant 30min (identifier précisément les échantillons).
- Après réalisation des essais physiques et chimiques au laboratoire, ne conserver que les échantillons représentatifs.

Important : Au moment du changement des réglages doseurs, garder le réglage du clinker fixe à 63.5%, tout ajustement du réglage du gypse se fait au détriment du calcaire.[2]

5.5. Analyse effectuées

En totalité les 3 étapes de l'essai nous donnent 28 échantillons, 6 échantillons de la première partie de l'essai, 15 échantillons de la deuxième partie et 7 de la dernière.

5.5.1. Analyse par spectrométrie de fluorescence X

Il est obligatoire de faire une analyse chimique en Pastille de tous les 28 échantillons après surbroyage et pastillage,

Surbroyage et Préparation des pastilles :

Principe : La quantité de matière à broyer ne doit pas dépasser 100 g, La quantité broyée sera ensuite pressée pour l'obtention d'une pastille.

Mode opératoire :

- Verser dans le bol la matière 20 g.
- Ajouter une quantité d'ajout (comprimés) pour éviter le colmatage de la matière dans le bol et faciliter le compactage de la pastille.
- Recouvrir le récipient de son couvercle.
- Introduire le récipient dans l'appareil de broyage.
- Broyer pendant 1 à 6 min (le temps dépend de la nature de matière broyée).
- Attendre l'arrêt complet du broyeur avant d'ouvrir le capot de protection.
- Récupérer la totalité du matériau sur broyé avec un pinceau.
- Mettre 10 g environ dans la presse à pastilles. - Récupérer la pastille et la nettoyer avec un léger jet d'air pressurisé des deux faces.

Matériels :

Un broyeur HERZOG ; Balance ; Spatule ; Un moule (Couvercle + Masselotte + Anneau + Bol).

Utilisation de l'appareil de fluorescence X :

A ce stade, les pastilles préparées sont placées à l'intérieur de l'appareil, à fin d'obtenir le résultat dans un ordinateur sous formes de pourcentages.

5.5.2. Détermination le refus de chaque échantillons

Cette analyse est réalisée pour déterminer le pourcentage des refus de ciment après broyage par des tamis de 45µm à l'aide d'un appareil ALPINE.

Mode opératoire :

- Faire sécher la matière à tamiser si nécessaire.
- Placer le tamis à utiliser sur le bâti.
- Peser 10g de matière et vider sur le tamis.
- Mettre en place le couvercle en plexiglas.

-Brancher l'appareil en tournant vers la droite le bouton de la minuterie jusqu'à la butée fixée d'avance sur 5 min avec le bouton moleté.

-Mettre en route l'aspiration

La minuterie étant branchée, la lance fendue commence à tourner, le ventilateur

L'aspiration de poussière démarre, le tamisage commence. A travers plexiglas on peut observer directement le tamisage, Si au début de l'opération, une partie de la matière se colle au couvercle, il faut la décoller, aussi longtemps que nécessaire, en donnant toutes les 10 secondes environ quelques coups sur le, bouton du couvercle avec le marteau en matière plastique. Par la suite, la matière grossière, soulevée par le courant d'air nettoie elle-même le couvercle. L'ouverture d'aspiration dans le talon du bâti du tamis doit être absolument libre. On peut tirer le couvercle pour un court instant afin d'écraser des grumeaux éventuels. Du fait de l'aspiration, il ne se produit pas de perte de matière, Lorsque les 5 minutes sont écoulées, l'appareil s'arrête automatiquement, couper alors l'aspiration Peser la matière restant sur le tamis.

5.5.3. Essai de résistance à compression

Préparations des moules

Chaque échantillon doit être versé dans le malaxeur et le met en marche, puis il faut Verser le mélange dans le moule à l'aide d'une spatule et met le moule dans l'appareil à choc pour entasser les bulles d'air et on racle la surface du moule.

La moule se conservé dans une armoire d'humidité de 97 % pendant 24h, et après il faut démoulage et conserver les éprouvettes dans des casiers remplis par l'eau pour faire la casse de 2j ; 7j ; 28j



Figure 21: Moule à ciment en acier

6. Résultats et interprétations

6.1. Résultats d'analyse de fluorescence X

Les tableaux suivants présentent les % des oxydes existes dans les 28 échantillons prélevés au cour d'essai :

Tableau 11: Résultats de FRX des échantillons de première étape

Sample	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)
--------	----------------------	------------------------------------	------------------------------------	---------	---------	---------------------

ESSAI N°1 N°1	16,57	4,27	2,41	57,07	1,28	2,97
ESSAI N°1 N°2	16,52	4,26	2,39	56,3	1,28	3,18
ESSAI N°1 N°3	16,61	4,26	2,39	56,44	1,27	3,33
ESSAI N°1 N°4	16,49	4,26	2,39	56,32	1,27	3,44
ESSAI N°1 N°5	16,65	4,28	2,4	56,3	1,26	3,51
ESSAI N°1 N°6	16,58	4,28	2,39	56,19	1,26	3,46

-Dans ces 6 échantillons les % de SO₃ augmente progressivement au parallèle avec l'augmentation de pourcentage de gypse au niveau des doseurs.

Tableau 12: Résultats de FRX des échantillons de 2 ème partie de l'essai

Sample	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO3 (%)
ESSAI N°2 N°1	16,56	4,25	2,39	56,6	1,24	3,33
ESSAI N°2 N°2	16,53	4,25	2,39	56,37	1,24	3,45
ESSAI N°2 N°3	16,6	4,24	2,39	56,91	1,21	3,25
ESSAI N°2 N°4	16,45	4,21	2,39	57,5	1,16	2,93
ESSAI N°2 N°5	16,26	4,17	2,37	57,87	1,12	2,65
ESSAI N°2 N°6	16,34	4,19	2,39	58,4	1,1	2,47
ESSAI N°2 N°7	16,32	4,19	2,4	58,75	1,08	2,22
ESSAI N°2 N°8	16,32	4,19	2,42	59,48	1,05	1,87
ESSAI N°2 N°9	16,41	4,22	2,43	59,84	1,05	1,77
ESSAI N°2 N°10	16,56	4,29	2,45	60,11	1,04	1,5
ESSAI N°2 N°11	16,59	4,25	2,47	60,45	1,04	1,46
ESSAI N°2 N°12	16,58	4,26	2,47	60,69	1,04	1,43
ESSAI N°2 N°13	16,46	4,21	2,45	60,3	1,04	1,4
ESSAI N°2 N°14	16,61	4,24	2,48	60,9	1,04	1,35
ESSAI N°2 N°15	16,44	4,21	2,43	60,12	1,06	1,52

-la même chose ici, les 15 échantillons montrent une diminution progressive du pourcentage de SO₃, ceci est dû à la diminution du pourcentage de gypse au niveau de doseur de gypse lors de la partie 2.

Tableau 13: Résultats de FRX des échantillons de 3 ème partie de l'essai

Sample	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO3 (%)
ESSAI N°3 N°1	16,54	4,24	2,44	59,29	1,11	1,89
ESSAI N°3 N°2	16,5	4,23	2,45	59,5	1,12	1,99
ESSAI N°3 N°3	16,65	4,27	2,44	59,12	1,13	2,04
ESSAI N°3 N°4	16,58	4,23	2,44	58,95	1,13	2,12
ESSAI N°3 N°5	16,41	4,19	2,41	58,65	1,13	2,17
ESSAI N°3 N°6	16,54	4,23	2,41	58,76	1,13	2,21
ESSAI N°3 N°7	16,67	4,27	2,44	58,67	1,14	2,24

- les 7 derniers échantillons montrent une augmentation progressive du pourcentage de SO₃, ceci est dû à l'augmentation du pourcentage de gypse au niveau de doseur de gypse lors de la partie 3.

Remarque :

On a sélectionnez 8 échantillons avec un pourcentage de SO₃ approprié pour faire des essais mécanique. Et des analyses physiques et chimiques.

Ces 8 échantillons sont choisie d'une façon qu'ils soient représentative (en éliminant les % de SO₃ répété et sauvegardé seulement une valeur parmi les valeurs les plus proches.

6.2. Pourcentage de composants pour chaque échantillons

Le tableau ci-dessous montre le pourcentage de chaque composant de ciment dans les échantillons prélevés :

Tableau 14: les %des composants pour chaque échantillons

	<i>N d'Echantillons</i>							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>%SO₃</i>	1,99	2,21	2,47	2,65	2,93	3,18	3,33	3,51
<i>%clinker</i>	63,5	63,5	63,5	63,5	63,5	63,5	63,5	63,5
<i>%calcaire</i>	33,3	32,8	32	31,4	30,7	29,8	29,5	29
<i>%gypse</i>	3,2	3,7	4,5	5,1	5,8	6,7	7	7,5

✚ Le pourcentage de SO₃ pour tous les échantillons est inférieur à 4% (norme **10.1.005**)[3]

6.3. Suivis de quelques paramètres physico-chimiques

Le %SO₃ de tous les échantillons prélevés pendant l'essai est déterminé par la spectrométrie de fluorescence X, ainsi que d'autres analyses physiques et chimiques sont effectués :

Tableau 15: Analyses physique et chimique

<i>ECH</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<i>perte au feu</i>	13,74	13,49	13,49	13,46	13,1	12,66	12,78	12,58
<i>45µm Refus</i>	7,56	7,96	7,16	7,52	7,76	7,6	7,44	8,08
<i> finesse Blaine (cm²/g)</i>	4254	4564	4159	4065	4375	4428	4409	4360
<i>%CaO</i>	56,3	56,3	56,4	57,5	57,87	58,4	59,12	58,65
<i>%SiO₂</i>	16.52	16.61	16.65	16.45	16.26	16.34	16.65	16.41

✚ La variation du taux des oxydes dépend des pourcentages des constituants calcaires et clinker.

✚ La perte au feu augmente avec la diminution du pourcentage du gypse dû à l'augmentation de pourcentage du calcaire.

✚ Les valeurs obtenues par la détermination % refus à 45 µm sont dans la tolérance permise (8+/-0,5 %) [3]

✚ La finesse Blaine doit être > à 2200 selon NM 10.1.005 [3] et c'est le cas.

Remarque :

Il y a trois facteurs parmi les facteurs qui ont été étudiés qui ont un effet sur la résistance du ciment ces facteurs sont le pourcentage de SO₃, le taux d'oxydes provenant du clinker et le refus à 45 µm, et selon nos résultats, le pourcentage de SO₃ qui change clairement, par contre les deux autres sont quasi stable donc cela n'affecte pas la résistance.

⇒ Nous allons traiter seulement l'évolution des résistances en fonction d'un seul facteur qui est le SO₃ en utilisant ces mêmes échantillons.

6.4.Résultats de Gâchage et de temps de prise

Des essais mécaniques (gâchage et temps de prise) sont appliqués après sur les Échantillons afin d'avoir les résistances à 1-2-7-28 jours, ainsi que le temps de début et de fin de prise les résultats obtenus sont indiqués par le tableau suivant :

Tableau 16: Essais mécaniques (gâchage et temps de prise)

ECHANTILLONS	SO ₃ %	RESISTANCE A COMPRESSION				TEMPS DE PRISE	
		rj1 (MPa)	rj2 (MPa)	rj7 (MPa)	rj28 (MPa)	Début (min)	fin (min)
1	1,99	8,75	15,25	25,4	36,8	136	215
2	2,21	9,4	14,53	26,1	37,2	147	225
3	2,47	9	15,83	26,8	37,3	153	234
4	2,65	8,15	15,32	22,15	35,3	155	237
5	2,93	6,95	13,48	26	35,23	156	244
6	3,18	6,5	13,93	24,95	36	160	246
7	3,33	6,15	13,73	22,95	34,2	160	247
8	3,51	5,45	10,25	22,35	33,23	163	250

rji : résistance au i^{ème} jour.

✚ Tout d'abord Pour tous les types de ciment, la résistance à la compression de 28 jours, a déterminée selon NM 10.1.005, doit satisfaire aux spécifications statistique suivante Lim inférieure =32.5MPa, et Lim supérieure = 55MPa [3]

✚ La résistance du 2ème jour, doit être supérieure ou égale 13.5MPa.

6.5. La représentation graphique de ces résultats est donnée par les figures 22 à 23

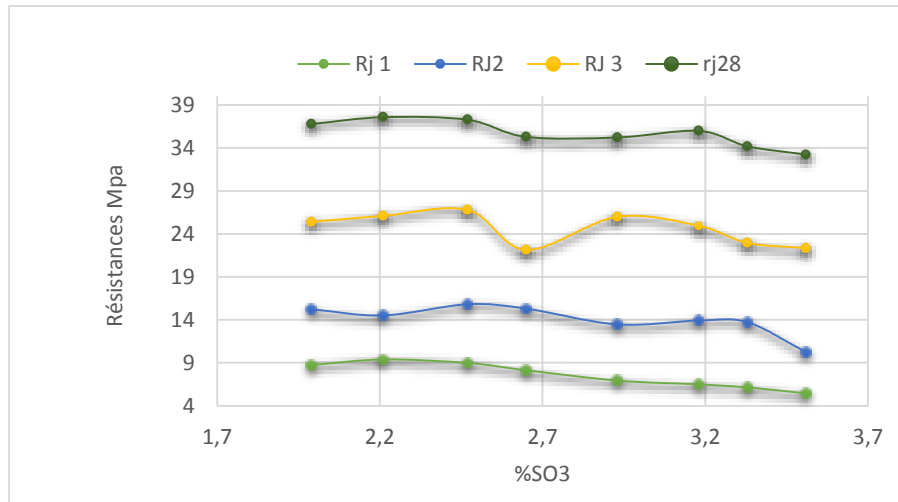


Figure 22: courbe des résistances en fonction de % de SO₃

✚ les résultats nous montre que tous les résistances à 28 jours sont conformées à la norme.

✚ Enfin on peut voir que La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout gypse.

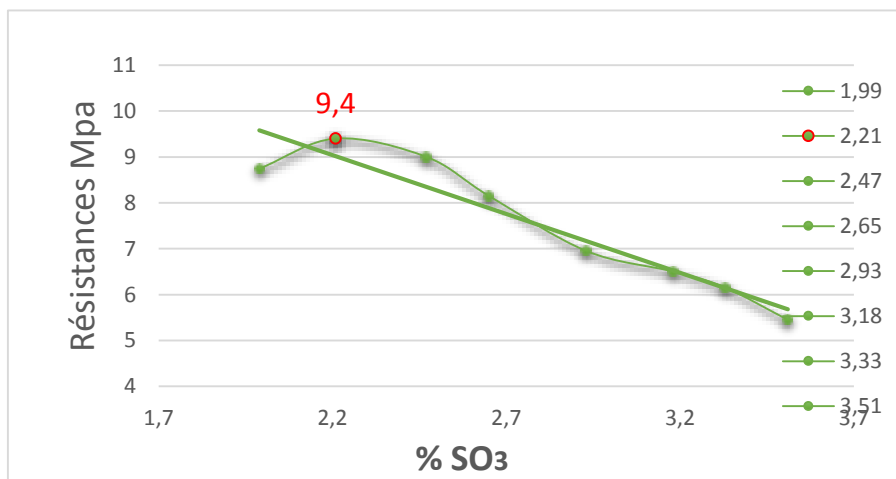


Figure 23: courbe de résistance de 1er jour en fonction de %SO₃

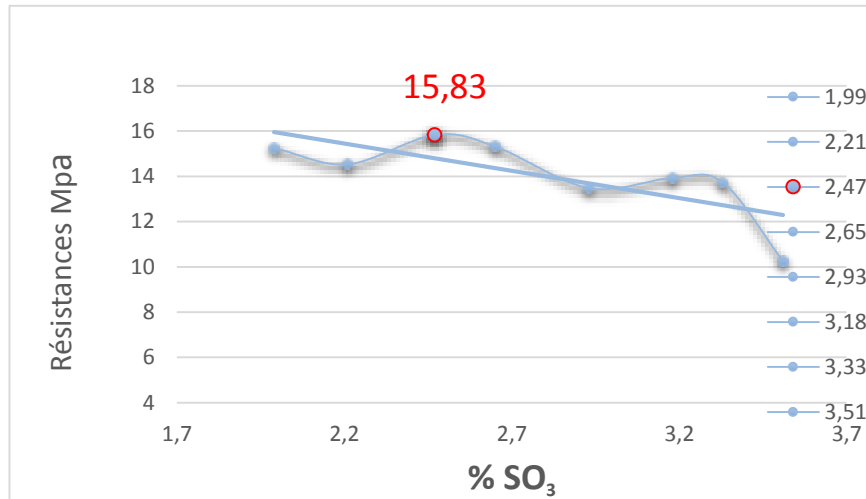


Figure 24: courbe de résistance de 2ème jour en fonction de % SO₃

✚ Après avoir tracé la courbe des résistances en fonction du %SO₃, on observe une augmentation de la résistance avec l'âge.

✚ Pour les courbes du jeune âge c'est-à-dire le 1er le 2^{ème} jour, on a une courbe de tendance baissière.

✚ La résistance diminue en fonction de l'augmentation de SO₃

✚ La valeur supérieure pour la résistance de 1er jour est **2.21%** correspond à **9.4MPa**

Pour le 2^{ème} jour, la valeur supérieure est **2.47%** correspond à **15.83 MPa**.

✚ Cette résistance selon la norme doit être supérieure à 13.5MPa, on peut consulter qu'avec augmentation de % SO₃ cette résistance peut sortir de la norme exp : 10.25MPa pour un %SO₃=3.5%

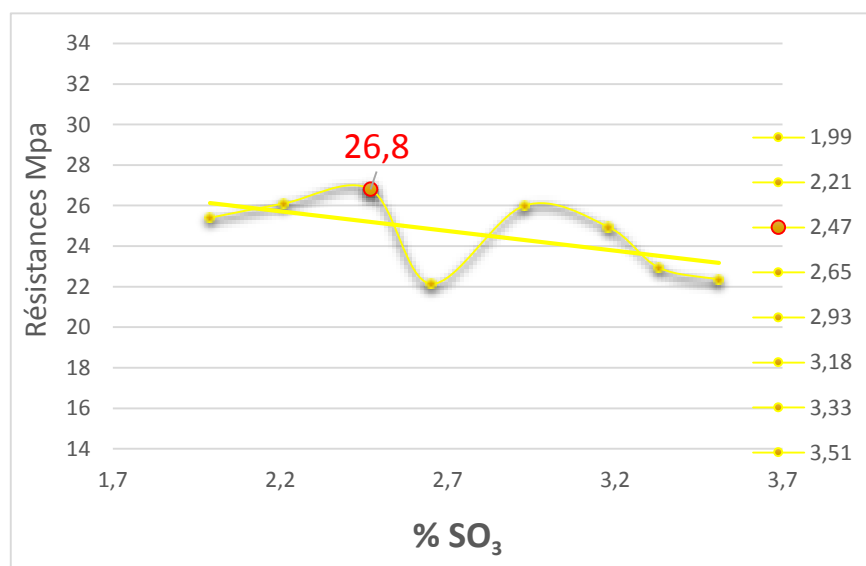


Figure 25: courbe de tendance de résistance de 7ème jours en fonction de %SO₃

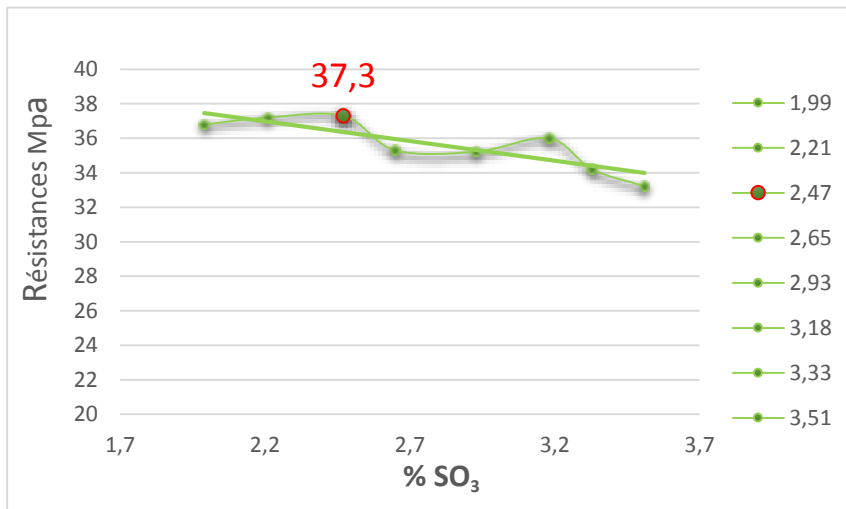


Figure 26: courbe de tendance de résistance de 28ème jours en fonction de %SO₃

✚ La ligne de tendance à 7 et 28 jours est également baissière. A noter que la valeur supérieure des deux courbes correspond à 2,47% SO₃, 37,3 MPa.pour 28 jours et 26.8 MPa pour le jour 7.

✚ Les valeurs de résistance à 28 jours restent conforme à la norme : [32.5MPa-55MPa].

✚ L'intervalle de % SO₃ qui donne une meilleure résistance est [2.21-2.47] mais pour confirmation, nous devons également justifier du côté financier.

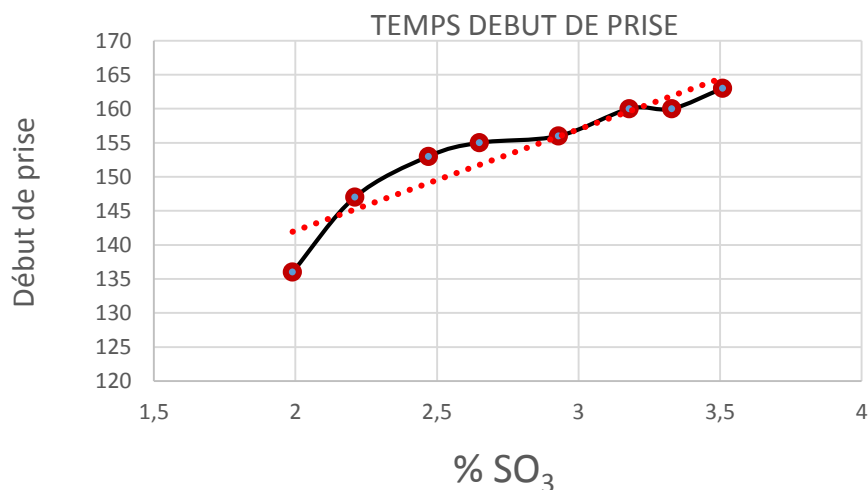


Figure 27: Début de prise en fonction de %SO₃

✚ Le temps de début de prise est en corrélation avec le %de SO₃ (corrélation linéaire car il donne une mesure de l'intensité et du sens de la relation linéaire entre les deux variables), Avec l'augmentation du %SO₃, le temps de début de prise augmente également.

✚ Toutes les valeurs sont supérieures à 90, pour tous les échantillons ciment et leur classes de résistances, le temps de prise déterminé selon NM 10.1.005 et >90.

6.6.Détermination du cout avec le revenu de l'essai du ciment à l'échelle industriel

Ce tableau indique le coût du chaque composé en DH/t:

Tableau 17: Prix de calcaire,gypse et clinker en DH/t

Composées	Clinker	Calcaire	Gypse
Cout DH/t	280	20	80

Tableau 18 : Cout de ciment MAD/ton en fonction de %SO₃

	1,99	2,21	2,47	2,65	2,93	3,18	3,33	3,51
RJ 7 MP	25,4	26,1	26,8	22,15	26	24,95	22,95	22,35
RJ 28	36,8	37,2	37,3	35,3	35,23	36	34,2	33,23
TOTAL MAD	187	187,3	187,8	188,2	188,6	189,1	189,3	189,6

✚ Ce tableau indique le coût du ciment pour chaque échantillon en fonction du pourcentage de chaque composé, exemple de calcul de coup de 1^{er} échantillon :

$$total\ MADE = \frac{\%de\ clinker * prix\ de\ clinker}{100} + \frac{\%de\ calcaire * prix\ de\ calcaire}{100} + \frac{\%de\ gypse * prix\ de\ gypse}{100}$$

$$total\ Made\ de\ 1er\ ECH = \frac{63.5 * 280}{100} + \frac{33.3 * 20}{100} + \frac{3.2 * 80}{100} = 187\ Dh/t$$

✚ à partir des couts de chaque échantillon (tableau 18) on peut s'assurer que les 3 premiers échantillons donne un prix raisonnable (187, 187.3, 187.8, ils ont été indiqué en vert au tableau), ils sont considéré comme raisonnable car ils sont proche du prix normal de la recette.

✚ Pour les années 2019-2020 : A l'échelle industrielle, le tonnage de production du ciment pour LafargeHolcim Meknès est estimé à **400000 t/ année**,

Tableau 19: Quantité de production du ciment CPJ45 en tonne par année

Qualité	CPJ45	Ciment
%	40	100
tonne / année	160000	400000
tonne / jour	438.36	1200

Tonne/jour de CPJ45 = $40 \times 400000 / 100$
 = 160000t / année
 = $160000 / 365 = 438,36$ t/ jour

Tableau 20: Les nouveaux essais de fabrication du ciment CPJ45 trouvé par la méthode directe

Méthode directe de gypsage optimum							
Ciment	Clinker	Gypse	Calcaire	Rés 28 jrs	cout DH/t	Perte DH/t	Perte DH/ année
CPJ45	63.5	4.5	32	37.3	187.8	-0.1	-16000

Remarque :

Les nouveaux pourcentages de calcaire et de gypse ainsi proposés par cette méthode nous donnent 0,1 dirhams/t de coût supérieur à la recette normale, nous avons donc décidé de décomposer nos résultats en un plan de mélange pour chercher la résistance de 28 jours à adopter correspondante à un % de gypse économiquement acceptable.

7. Application du plan de mélange pour déterminer une composition de CPJ45 donne une Résistance à 28 jours optimale

7.1. Définition de PLAN DE MELANGE

Les facteurs d'étude des plans de mélanges sont les proportions des constituants du mélange. Or, ces constituants ne sont pas indépendants les uns des autres. La somme des proportions d'un mélange est toujours égale à 100%. Le pourcentage du dernier constituant est imposé par la somme des pourcentages des premiers composés. C'est la raison pour laquelle les plans de mélanges sont traités à part.

Les plans de mélanges sont aussi caractérisés par de nombreuses contraintes qui peuvent peser sur le choix des proportions des constituants. Par exemple, la concentration d'un produit doit être au moins de x pour-cent ou cette concentrationne peut excéder une valeur donnée. En fonction de ces contraintes la planification del'étude est modifiée et elle doit être adaptée à chaque cas.

Modèles mathématiques des mélanges :

La contrainte fondamentale des mélanges fait disparaître la constante et les termes du second degré se réduisent aux termes rectangles. Pour trois composants, le modèle du premier degré est donc : $b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3$

et pour le second degré :

$$y = b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3$$

Le 3^{ème} degré :

$$Y = b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3$$

7.2. Objectif :

Mettre au point une composition de ciment qui réunit la propriété suivante : Résistance à 28 jours élevés.

Pour atteindre ce but on utilisera un plan de mélange qui nous donnera toutes les possibilités pour atteindre l'objectif suivant :

- Résistance élevée à 28 jours Y1

Le ciment cp45 se forme à partir de 3 composées : clinker X1, calcaire X2, gypse X3.

Dans cette étape on a choisi le pourcentage de gypse d'après ce que j'ai trouvé dans les résultats précédents [2.21 – 2.47] de %SO₃ équivalents au [3.7-4.5] de gypse,

Avec Les composantes ne doivent pas dépasser les valeurs décrites dans le tableau suivant :

Tableau 21: limites hautes et basses des 3 composées utilisées en plan de mélange

<i>Composées</i>	Limite basse	Limite haute
<i>clinker</i>	0.6345	0.635
<i>calcaire</i>	0.32	0.335
<i>gypse</i>	0.03	0.045

Donc nous allons travailler dans un pseudo-triangle au lieu du triangle élémentaire de coordonnées (1.0.0) (0.1.0) et (0.0.1), La réponse s'écrit en modèle mathématique suivant :

$$Y_1 (\text{Résistance 28jrs}) = b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3$$

7.3. Génération de la matrice d'expérience

Le plan d'expérimentation affiche les proportions des composants, en tenant compte des contraintes individuelles (et éventuellement relationnelles) et de la somme des proportions des composants :

Tableau 22: plan d'expérimentation généré par NemroodW

N°EXP	X1 « clinker »	X2 « calcaire »	X3 « gypse »	Résistance 28 jrs
1	0.6345	0.33550	0.0300	36.000
2	0.6350	0.33500	0.0300	36.7000
3	0.63450	0.32050	0.04500	37.7000
4	0.63500	0.32000	0.04500	37.8000
5	0.63475	0.33525	0.03000	36.5000
6	0.63450	0.32800	0.03750	37.0000
7	0.63500	0.32750	0.03750	37.2000
8	0.63475	0.32025	0.04500	37.9000
9	0.63475	0.32775	0.03750	37.0000
10	0.63487	0.32388	0.04125	37.6500

7.4.Mode opératoire

Les ciments utilisés dans tous les essais ont été préparés au niveau du laboratoire de la cimenterie de Lafarge Meknès.

-Concassage de clinker et les ajouts par le concasseur de laboratoire. Les 3 composés composants (clinker, calcaire et gypse) ont été broyés séparément (de l'ordre de micron) dans des broyeurs de laboratoire (voir la figure26).



Figure 28: Broyeur de laboratoire



Figure 30:calcaire avant concassage



Figure 29:calcaire après concassage



Figure 31:clinker avant concassage



Figure 32:clinker après concassage



Figure 33:Gypse avant concassage



Figure 34:Gypse après concassage

✚ Ces matériaux ont été mis dans des sacs puis mélangés, selon des proportions bien définies, afin d'obtenir des produits plus ou moins homogènes.

✚ Dans cette étude, l'ajout clinker est substitué à un pourcentage plus au moins constant (63.5% +/- 0.5%).

7.5.Coefficients de modèle mathématique :

$$Y_1(\text{Résistance}) = 26445.327 X_1 - 37275.419X_2 + 5417884.830X_3 - 130990.169X_1X_2 + 8461806.698 X_1X_3 + 18032629.440 X_2X_3 - 28404112.35 X_1X_2X_3$$

Tableau 23: Coefficients de modèle mathématique

Nom	Coefficient
b1(clinker)	26445.327
b2(calcaire)	-37275.419
b3(gypse)	5417884.830

b1-2	-130990.169
b1-3	8461806.698
b2-3	18032629.440
b1-2-3	-28404112.35

✚ clinker (b1) et le gypse (b3) ont un **effet positif** sur la résistance 28 jrs (Y1) du ciment CPJ45, Donc plus le % de clinker et de gypse augmente plus la résistance du ciment CPJ45 augmente.

✚ Le calcaire (b3) à un **effet négatif** sur la résistance 28 jrs (Y1), Donc plus le % de calcaire augmente plus il y a une diminution de résistance 28 jrs du ciment CPJ45.

✚ L'interaction entre le clinker et le calcaire à un **effet négative** sur la résistance du ciment CPJ45.

✚ L'interaction de gypse avec le clinker ou le calcaire à un **effet positive** sur la résistance du ciment CPJ45.

✚ L'interaction entre le calcaire et le clinker et la pouzzolane à un **effet négative** sur la résistance du ciment CPJ45.

7.6. Validation du modèle de réponses

Pour ce faire on examine le P-value et R^2 et $R^2_{ajusté}$:

Tableau 24: Paramètres de validation de modèle

	Résistance	Valeur de référence
P-value	0.033	=<5%
R^2	0.956	>=80%
$R^2_{ajusté}$	0.888	>=70%

✚ Tous les paramètres répondent aux exigences, donc on peut déclarer que le modèle est valide.

✚ Une fois le modèle validé, il est possible de l'utiliser pour calculer la valeur de la réponse en tout point du domaine d'étude. L'optimisation d'une réponse peut se faire à l'aide de plusieurs outils d'aide à l'interprétation.

La recherche d'une zone de compromis acceptable entre plusieurs réponses peut se faire :

- ⇒ à partir de graphiques représentant des surfaces de réponse
- ⇒ ou numériquement (désirabilité).

7.7. désirabilité et Optimum

On doit indiquer le type de fonction désir de chaque réponse. La fonction désir individuelle (élémentaire) peut servir les objectifs suivants :

- quelconque,
- maximiser une réponse (unilatéral gauche),
- minimiser une réponse (unilatéral droit),
- atteindre une valeur cible (bilatéral),
- rester dans un intervalle de valeurs (bilatéral avec tolérance).

-Il suffit de sélectionner une transformation pour voir apparaître la représentation graphique de cette transformation.

On désire d'avoir une résistance optimale entre 37 et 38 Donc la fonction de désirabilité (bilatérale avec tolérance) sera comme suit :

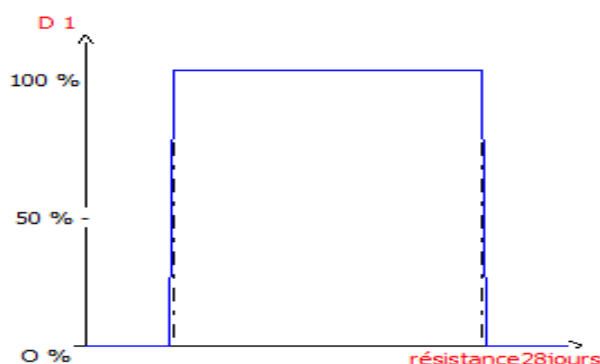


Figure 35: Fonction de désirabilité élémentaire de la

7.7.1. Résultats de l'étude de la désirabilité

Courbe d'isoréponse en 2D

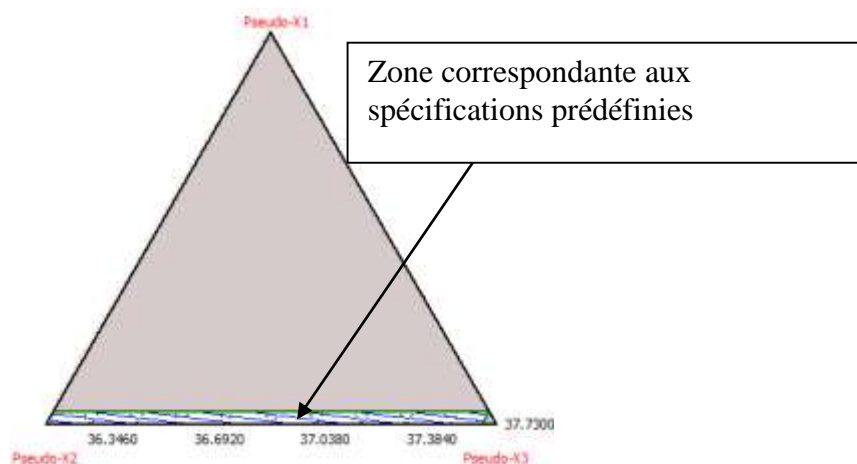


Figure 36: Variation de la désirabilité dans le plan : clinker, Calcaire, gypse

Dans la zone Blanche, on cherche une valeur optimum de résistance 28 jrs du ciment CPJ45 parmi plusieurs valeurs qui caractérisent par : une résistance avec une faible incertitude et corresponde aux conditions de désirabilité.

7.7.2. Détermination de de l'optimum

Le logiciel NemrodW affiche les coordonnées de l'optimum, qui constitue le point de départ de la recherche. Par défaut, il est égal au centre du domaine lors de la première recherche

Coordonnées de l'optimum						
Variable	Valeur	Composant	Valeur			
X1	0.63450000	clinker	0.6345			
X2	0.3275000	calcaire	0.3275			
X3	0.0380000	gypse	0.038			
Caractéristiques du maximum						
Réponse	Nom de la réponse	Valeur	di %	Poid	di min %	di max
Y1	résistance28jours	37.9858	100.00	1	0.00	100.00
	DESIRABILITE		100.00		0.00	100.00

La Réponse optimale

Figure 37: Recherche de l'optimum par Nemrod

7.7.3. Livrable

⇒ L'optimum correspond à 63.45% pour le clinker, et 32.75% pour le calcaire, et 3.8% pour le gypse on aura une réponse Y1 (Résistance à 28jours) égale à 37,9858 MPa.

7.8. Etude de cout

⇒ Ainsi pour la composition obtenue par l'application du plan de mélange on estime le cout à 187.25 MAD.

Tableau 25: Estimation du revenu pour la composition optimale du CPJ45 trouvé par le plan de mélange

Méthode directe + plan de mélange							
Ciment	Clinker	Gypse	Calcaire	Rés 28 jrs MPa	Cout DH/t	Gain supplémentaire DH/t	Gain supplémentaire DH/ année
CPJ45	63.45	3.8	32.75	37.98	187.25	0.45	72000

On peut dire que cette étude de plan de mélange nous donne un bon résultat au niveau financier, Avec un Gain supplémentaire annuelle de 72000 DH.

Conclusion générale

Ce travail est une recherche :

- ✚ de pourcentage de gypse optimal pour un ciment CPJ45 ;
- ✚ De l'optimum de propriété physico-mécanique des pâtes de ciment basé sur la variation de pourcentage du gypse dans le ciment (CPJ45) de classe de résistance de 28 jours.
- ✚ Des facteurs influençant la résistance à la compression de CPJ45.
- ✚ D'une recette finale positive : (un ciment de bonne qualité et à bon prix).

D'après les résultats expérimentaux obtenus par la méthode directe de gypsage optimum, il ressort que la variation du gypse est responsable à l'amélioration de la réactivité rapide des ciments avec différents pourcentages du gypse et résistances mécaniques des mortiers.

Les résultats obtenus dans cette étude expérimentale nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Les résistances à la compression de tous les tests de ciment augmentent régulièrement avec l'âge.
- La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout de gypse.
- Le sulfate de calcium (gypse) en général amène à une diminution de la vitesse d'hydratation du ciment et donc :
 - ✚ A une augmentation du début de prise.

Enfin pour assurer une bonne qualité des ciments (CPJ45) avec caractéristique physico-chimiques et mécanique conforme à la norme il faut toujours chercher l'optimum de gypse dans notre cas l'optimum de gypse est 3.8% avec la recette suivante :

Composés	Clinker	Calcaire	Gypse
%	63.45%	32.75%	3.8%
PRIX DH/t	187.25		

Références Bibliographiques:

[1] Histoire de la section de Lafarge de 1998 à 2019

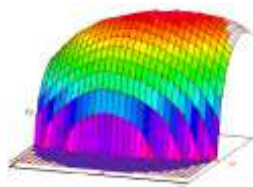
[2] Protocole de l'essai industriel gypsage optimum 2017/2018.

[3] Recueil des normes sur specifications ciments :NORME MAROCAINE 10.1.005 /NORMA MAROCAINE 10.1.156/ NORME MAROCAINE 10.1.157/ NORME MAROCAINE 10.1158/ CIRCULAIRE PARTICULIERE

[4] Siline Mohammed¹ , Omary Safiullah² « Optimisation de la teneur d'un ciment en SO₃:Étude de l'effet du taux de sulfatage sur les propriétés physicomécaniques d'une matrice cimentaire », Université de M'sila; Algérie

[5] SILINE M., OMARY S., « Optimization of the SO₃ content of an Algerian Portland cement: Study on the effect of various amounts of gypsum on cement properties», Construction and Building Materials, vol. 164, 2018, p. 362-370

[6] Mr. Siline Mohammed « Optimisation de la teneur en gypse dans Le ciment composé CEM II », Université Mohamed Boudiaf - M'sila Faculté de Technologie.



Master ST CAC Ageq

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom : kHAOULA Ait timachchirine

Année Universitaire : 2020/2021

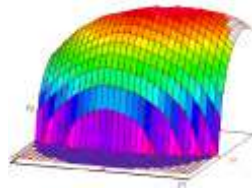
Titre: Optimisation du pourcentage de gypse dans le ciment CPJ45

Résumé

La littérature des matériaux cimentaires est riche des recherches qui entrent dans le cadre de l'amélioration des performances de ciment. Parmi ces recherches on trouve le pourcentage optimal de gypse dans un ciment, la teneur en gypse qui est connu par son rôle de régulateur de prise et le plus souvent prise à 4.3% pour le ciment CPJ45 à l'usine de Meknès.

Cependant cette teneur qui varie d'un auteur à l'autre, peut influencer sur d'autres propriétés telles que : la résistance mécanique, Le but de ce travail est de chercher à travers une campagne expérimentale et des formules théoriques, l'optimum de gypse pour un ciment CPJ45 à l'usine lafargeHolcimMeknès. dans ce but nous avons utilisé un plan de mélange qui est un plan d'expériences que l'on utilise lorsque l'on étudie des produits composés de plusieurs constituants à fin de trouver la loi qui régit une ou plusieurs réponses en fonction de la composition du mélange en prenant la résistance à 28jours comme réponse.

Mot clés : Ciment, clinker, gypse, calcaire, résistance à la compression.



Master ST CAC Ageq

End of studies thesis for obtaining the Master's Degree in Science and Technology

Name and first name: KHAOULA Ait timachchirine

University Year: 2020/2021

Title: Optimization of the percentage of gypsum in CPJ45 cement

Abstract

The literature of cementitious materials is rich in research that falls within the scope of improving the performance of cement. Among this research is the optimal percentage of gypsum in a cement, the gypsum content which is known by its role as a setting regulator and most often set at 4.3% for the CPJ45 cement at the Meknes plant.

However, this content, which varies from one author to another, can influence other properties such as: mechanical resistance, The goal of this work is to seek through an experimental companion and theoretical formulas, the optimum of gypsum for a CPJ45 cement at the lafargeHolcimMeknès factory. for this purpose we used a mixing plan which is a design of experiments that is used when studying products composed of several constituents in order to find the law which governs one or more responses depending on the composition of the mixture, taking the 28-day resistance as a response.

Keywords: Cement, clinker, gypsum, limestone, compressive strength