



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des sciences et de la technologie
Department de chimie industrielle

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie chimique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Djebbari Oussama Charaf Eddine

Le : Lundi 28 septembre 2020

Influence des Eléments Mineurs et Majeurs Sur la Réactivité du Clinker

Jury :

Mme. Menasra Hayet	MCA Université de Biskra	Président
Mme. Aidi Amel	MCA Université de Biskra	Examineur
Mme. Adjal Fatima	MCA Université de Biskra	Rapporteur
Mr. Azzaz Yacine	Qualité Manager CILAS	Co-Rapporteur

Année universitaire : 2019 - 2020

DÉDICACE

*Je dédie ce travail à ma Grand père mes
parents dont le soutien et les
Encouragements ininterrompus ont permis à
ce travail de voir le*

Jour

Mes Frères

*A MES CHERS AMIES (Aba, Daha, Vardy,
Dada, Chicha, Mimo, Aymen, Boub, Dakhi,
Abdou, Khaled, Zino, Nadjemo, Morzagua,
Majda, Warda, Sabrina ...)*

A toute ma famille

*Que ce travail soit une part de ma
reconnaissance envers eux.*

REMERCIEMENTS

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon
Encadreur de mémoire M^{me} ADJAL Fatima. Je le
Remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.
Mes remerciements vont également aux membres de jury
d'avoir accepté de juger mon travail : M^{me}. Menasra .H et
M^{me} Aïdi .A.*

*Je remercie très spécialement Groupe de Qualité en Usine de
CILAS (Walid, Samire, Yacine, Doug Doug, Med Chalouay,
Med Bouziane, Hadje Khaled, Badri, Hamza, Khaled,
Dakhi, Zahia).*

*J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs,
Intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles,
Leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes
Réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes
Questions durant mes recherches.*

*Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là
Pour moi,*

*Je tiens à remercier mes camarades de classe, pour leur
Amitié, leur soutien inconditionnel et leur encouragement.
Enfin, je remercie tous mes Amis que j'aime pour leur
Sincère amitié et confiance, et à qui je témoigne de ma
Reconnaissance et mon attachement.*

Résumé

Le ciment est un composant essentiel des matériaux cimentaire comme le béton et mortier. Il assure une fonction principale relie la structure granulaire; donc pour obtenir une bonne ciment l'accent doit être mis sur deux éléments importants, à savoir le clinker et la résistance mécanique.

L'analyse de caractérisation des clinkers et ciments a été faite selon les méthodes de la norme européenne EN 196-1, associée à d'autres méthodes de détermination de la composition minéralogique des clinkers.

Les résistances mécaniques à la flexion et à la compression des mortiers ($4 \times 4 \times 16$) cm^3 , comme paramètre de mesure de la durabilité; ont été déterminées à 2 et 28 jours.

Mots clés : ciment, clinker, résistance mécanique, réactivité de clinker.

Abstract

Cement is an essential component of cementations materials such as concrete and mortar. It performs a main function linking the granular structure; therefore to obtain a good cement the emphasis must be placed on two important elements, namely the clinker and the mechanical resistance.

The characterization analysis of clinkers and cements was carried out according to the methods of European standard EN 196-1, combined with other methods for determining the mineralogical composition of clinkers.

The mechanical flexural and compressive strengths of mortars ($4 \times 4 \times 16$) cm^3 , as a measure of durability were determined at 2 and 28 days.

Keywords: cement, clinker, mechanical resistance, reactivity of clinker.

ملخص

الأسمنت مكون أساسي في المواد الأسمنتية مثل الخرسانة والملاط. وهي تؤدي وظيفة الرئيسية التي تربط البنية الحبيبية. لذلك، للحصول على أسمنت جيد، يجب التركيز على عنصرين مهمين، وهما الكلنكر والمقاومة الميكانيكية. تم إجراء تحليل خصائص الكلنكر والأسمنت وفقاً لطرق المعيار الأوروبي EN 196-1، جنباً إلى جنب مع طرق أخرى لتحديد التركيب المعدني للكلنكر.

تم تحديد قوة الانحناء والضغط الميكانيكي للملاط ($16 \times 4 \times 4$) سم^3 ، كمقياس للمانة في 2 و 28 يوماً.

الكلمات المفتاحية: الأسمنت، الكلنكر، المقاومة الميكانيكية، تفاعل الكلنكر.

Sommaire

Liste des Figures.....	I
Liste des tableaux.....	III
Description du cimenterie CILAS de Biskra.....	IV
Introduction Générale	1
Chapitre I : Etude Bibliographique	
I. 1. Historique	4
I. 2. Définition du ciment	4
I. 3. Constituants de base du ciment.....	5
I. 3. 1. Matières premières.....	5
I. 3. 1. 1. Calcaire	5
a. Calcaire Dur.....	5
b. Calcaire Mou (Craie).....	5
I. 3. 1. 2. Argile	6
I. 3. 2. Les matières corrections.....	7
I. 3. 2. 1. Minerai de fer (Fe_2O_3)	7
I. 3. 2. 2. Sable.....	7
I. 3. 2. 3. Bauxite	8
I. 3. 2. 4. Gypse	8
I. 3. 3. Les matières secondaires.....	9
I. 3. 3. 1. Pouzzolane.....	9
a. Pouzzolane naturelle.....	9
b. Pouzzolane artificielle.....	10
I. 3. 3. 2. Les fillers calcaires	10
I. 3. 3. 3. Fumées de silice.....	10
I. 3. 3. 4. Le laitier de haut fourneau.....	10
I. 3. 4. Produit semi-fini (Clinker)	11
I. 4. Procédure de fabrication du ciment.....	11
I. 4. 1. Principe de fabrication.....	11
I. 4. 2. Procèdes et technique de fabrication.....	11
I. 4. 2. 1. Procèdes de fabrication	11
A. Procédé par voie humide (plus ancienne).....	11
B. Procédé par voie semi-humide	12

C. Procédé par voie semi-sèche.....	12
D. Procédé par voie sèche (plus utilisée).....	12
I. 4. 3. Technique de fabrication.....	12
I. 4. 3. 1. Extraction.....	13
I. 4. 3. 2. Concassage.....	13
I. 4. 3. 3. Pré-homogénéisation	14
I. 4. 3. 4. Broyage du cru.....	15
I. 4. 3. 5. Filtration (Séparation Gaz-matière).....	15
I. 4. 3. 6. Stockage et Homogénéisation.....	16
I. 4. 3. 7. Préchauffage.....	16
I. 4. 3. 8. Four rotatif.....	16
I. 4. 3. 9. Refroidisseur.....	16
I. 4. 3. 10. Stockage du clinker.....	17
I. 4. 3. 11. Broyage du clinker.....	17
I. 4. 3. 12. Stockage du ciment	18
I. 4. 3. 13. Ensachage et expédition.....	18
I. 5. Classification normalisée des ciments.....	18
I. 6. Le clinker.....	22
I. 6. 1. Définition de clinkerisation	22
I. 6. 2. Composition chimiques du clinker	22
I. 6. 2. 1. Les compositions chimiques majeures	23
a. Chaux (CaO).....	23
b. Silice(SiO ₂)	23
c. Alumine(Al ₂ O ₃).....	23
d. Ferrite(Fe ₂ O ₃).....	23
I. 6. 2. 2. Les compositions chimiques mineures.....	23
a. Magnésie (MgO).....	23
b. Alcalis (Na ₂ O et K ₂ O).....	24
c. Soufre.....	24
d. Chlorure.....	24
I. 6. 3. Les compositions minéralogiques du clinker	24
I. 6. 3. 1. Les compositions minéralogiques majeures.....	24
a. Silicate tricalcique C ₃ S.....	24

b. Silicate bicalcique C_2S	25
c. Aluminate tricalcique, C_3A	26
d. Aluminoferrite tétracalcique, C_4AF	26
I. 6. 3. 2. Les compositions minéralogiques mineures	26
a. La chaux libre (CaO_L).....	26
b. Sulfates alcalins.....	26
I. 6. 4. Les formules de bogue	27
I. 6. 5. Performances et composition chimique du clinker.....	28
I. 6. 5. 1. Facteur de saturation en chaux.....	28
I. 6. 5. 2. Module silicique	28
I. 6. 5. 3. Module alumino-ferrique.....	28
I. 6. 5. 4. Module cuvalle.....	28
I. 6. 6. Processus de la cuisson du clinker.....	29
I. 6. 6. 1. Séchage.....	29
I. 6. 6. 2. Préchauffage.....	29
I. 6. 6. 3. Calcination	30
I. 6. 6. 4. Refroidissement.....	31
Chapitre II : Méthodes des analyses et contrôles de qualité	
II. 1. Principe de laboratoire	33
II. 2. Méthodes chimique.....	33
II. 2. 1. Détermination de la chaux libre (CaO_L).....	33
II. 2. 1. 1. La méthode référence.....	33
II. 2. 1. 2. La méthode routine.....	34
II. 2. 2. Détermination du pourcentage de (SO_3) (la méthode référence).....	34
II. 2. 3. Détermination de la perte au feu (PAF).....	34
II. 2. 4. Analyse par fluorescence RX.....	35
II. 2. 5. Humidité	35
II. 3. Méthodes physico-mécaniques	35
II. 3. 1. Détermination du pourcentage des refus.....	36
II. 3. 2 Taux de calcaire.....	36
II. 3. 3. Mesure de la surface spécifique par la méthode Blaine (SSB).....	36
II. 3. 4. La consistance normale.....	37
II. 3. 5. Détermination du temps de prise.....	37
II. 3. 5. 1. Détermination du temps début de prise.....	38
II. 3. 5. 2. Détermination du temps fin de prise.....	38
II. 3. 6. Essais d'expansion.....	38
II. 3. 7. Essais mécaniques (flexion - compression).....	39
II. 3. 7. 1. Définition.....	39

II. 3. 7. 2. Appareillage	39
II. 3. 8. Mesure La chaleur hydratation (EN196-9).....	40
Chapitre III : Les matériaux, les essais utilisés et Résultat	
III. 1. Matières première.....	43
III. 1. 1. Clinker.....	43
III. 1. 1. 1. Compositions chimiques et minéralogiques du clinker	43
III. 1. 1. 2. Modules caractéristiques du clinker.....	44
III. 1. 2. Le gypse	45
III. 1. 2. 1. Les compositions chimiques.....	45
III. 2. Formulation des échantillons du ciment.....	45
III. 2. 1. Analyses chimiques et minéralogiques des échantillons ciments	46
III. 2. 2. Module cuvalle du ciment	46
III. 3. Formulation des mortiers normalisés.....	46
III. 3. 1. L'eau de gâchage.....	47
III. 3. 2. Le sable normalisé	47
III.4. Mesures expérimentales	47
III. 4. 1. Essai sur le ciment anhydre.....	47
III. 4. 1. 1. Mesure de la finesse du ciment (EN 196-6).....	47
a. Principe de l'essai.....	47
b. Conduit de l'essai	47
III. 4. 1 .2. Détermination du refus pour le ciment.....	49
III. 4. 2. Essais sur mortier.....	50
III. 4. 2. 1. Mortier normalisé	50
III. 4. 2. 2. Préparation des éprouvettes pour les essais mécaniques	50
Chapitre IV : Interprétations et Discussion	
IV. 1. Effet de C ₃ S sur la résistance compression.....	54
IV. 2. Effet de refus sur la résistance compression.....	55
IV. 3. Effet de Taux de calcaire sur la résistance compression.....	55
IV.4. Effet de les éléments chimiques mineur sur la résistance compression	56
Conclusion générale	58
Référence	60

Liste des Figures

Figure I.1 : Grain du calcaire	6
Figure I.2 : Argile	6
Figure I.3 : Minerais de fer.....	7
Figure I.4 : Grain de sable.....	8
Figure I.5 : Grain de gypse.....	8
Figure I.6 : Grains de pouzzolane.....	9
Figure I.7 : Organigramme de la chaîne de fabrication du ciment Portland..	12
Figure I.8 : Extraction la matière première.....	13
Figure I.9 : Concasseur	13
Figure I.10 : Hall de pré-homogénéisation	14
Figure I.11 : La technique de la pré-homogénéisation.....	14
Figure I.12 : Broyeur cru	15
Figure I.13 : Dessin du broyeur cru vertical.....	15
Figure I.14 : Four rotatif et préchauffage	16
Figure I.15 : Silo du clinker	17
Figure I.16 : Broyeur du ciment	17
Figure I.17 : expédition en sac.....	18
Figure I.18 : expédition en vrac	18
Figure I.19 : les pourcentages des compositions chimiques principales en clinker.....	23
Figure I.20 : Micrographie de clinker montrant ses quatre phases cristallines principales.....	25
Figure I.21 : Image de C_3S et C_2S sous microscope optique.....	25
Figure I.22 : Image de C_3A et C_4AF sous microscope optique.....	26
Figure I.23 : Les phases de clinker.....	27
Figure I.24 : Dessin représentant les minéraux observables au microscope optique d'un grain de clinker.....	27
Figure I.25 : Les cyclones	29
Figure I.26 : Schéma indiquant le processus pour l'obtention du clinker.....	30
Figure I.27 : Opération du refroidisseur.....	31
Figure I.28 : Les étapes de cuisson du clinker.....	31
Figure II.1 : Analyseur XRF.....	35

Figure II.2 : Alpine de refus	36
Figure II.3 : Appareil de Blaine.....	37
Figure II.4 : Principe de fonctionnement de Blaine.....	37
Figure II.5 : Appareil Vicat.....	38
Figure II.6 : Mesure de prise	38
Figure II.7 : Moule d'expansion	39
Figure II.8 : Moule de 4 cm x 4cm x16cm.....	39
Figure II.9 : Malaxeur.....	39
Figure II.10 : Chambre d'humidité	40
Figure II.11 : Table à vibrante.....	40
Figure II.12 : Appareil de flexion et compression.....	40
Figure II.13 : Appareil de chaleur hydratation.....	41
Figure III.1 : Sable normalisé	47
Figure III.2 : Blaine mètre.....	48
Figure III.3 : Tamiseuse Alpine	49
Figure III.4 : Eprouvette (4x4x16) cm ³	50
Figure III.5 : Malaxeur semi- automatique.....	50
Figure III.6 : Table vibrante.....	50
Figure III.7 : Chambre d'humidité	51
Figure III.8 : la presse de flexion et compression.....	51
Figure IV.1 : La résistance compression en fonction de C ₃ S.....	54
Figure IV.2 : La résistance compression en fonction refus 45µm.....	55
Figure IV.3 : La résistance compression en fonction taux de calcaire.....	55
Figure IV.4 : La résistance compression en fonction de cuvalle.....	56

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Principales catégories de ciment.....	19
Tableau I.2 : Les compositions chimiques de clinker.....	22
Tableau III-1 : Principaux constituants de clinker.....	43
Tableau III-2 : Les compositions chimiques du clinker.....	43
Tableau III-3 : Les compositions minéralogiques du clinker	44
Tableau III-4 : Les Modules caractéristiques du clinker.....	44
Tableau III-5 : Les compositions chimiques du gypse	45
Tableau III-6 : Les compositions chimiques du ciment.....	46
Tableau III-7 : Les compositions minéralogiques du ciment.....	46
Tableau III-8 : Le Module caractéristiques Q_v du ciment	46
Tableau III-9 : SSB de différent échantillon.....	48
Tableau III-10 : Caractéristiques de refus 45μ , 90μ et taux de calcaire.....	49
Tableau III-11 : Résultats de flexion et compression.....	52

Description du cimenterie CILAS de Biskra

CILAS est un partenariat privé privé entre le Groupe Souakri 51% et lafargeHolcim 49%.

D'une capacité de 2.7 millions de tonnes par ans, la cimenterie de Biskra répond aux besoins du marché du ciment du sud algérien. Il s'agit de l'usine la plus récente construite par LafargeHolcim.

Le coût d'investissement s'élève à 35 milliards de dinars algériens.

Construite en 21 mois, avec plus de 5 millions d'heures travaillées sans accident, Cilas compte plus de 600 collaborateurs et permet de réduire significativement les importations de ciment du pays.

Le Groupe Souakri est un groupe algérien présent dans les activités des matériaux de constructions, l'agriculture, logistiques & services, pharmacie, mortiers & ciments colle CMA en partenariat avec lafargeholcim Algérie et les véhicules industriels.



CILAS (Lafarge ciment de Biskra)

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie cimentière met aujourd'hui à la disposition de l'utilisateur un grand nombre de ciments qui présentent des caractéristiques précises et adaptées à des domaines d'emploi déterminés. La gamme étendue de compositions, de résistances, de vitesse de prise et de durcissement répond aux usages très divers qui sont faits du béton sur chantier ou en usine, pour la réalisation de bâtiments ou de structures de génie civil.

Le ciment de liaison hydraulique est une substance inorganique finement broyée qui, lorsqu'elle est mélangée à de l'eau, forme une pâte qui collera et se solidifiera en réaction pendant le processus d'hydratation. Après durcissement, cette pâte conserve résistance et stabilité même dans l'eau, dans les composants de ciment il y a un composant principal pour fabrication du ciment ce composant est clinker.

Le clinker est une substance artificielle, qui résulte de la cuisson d'un mélange de 80% calcaire et 20% argile à une température de 1450 ° C, et il se présente sous forme de cristaux. En même temps que le clinker est cuit, des réactions se produisent pour former des éléments qui ont un effet sur la réactivité du clinker.

Le but de notre travail est l'étude de l'effet des éléments majeurs et mineurs sur la réactivité de clinker de ciment de Biskra. Les essais effectués sont les suivants :

- Analyses chimiques et minéralogiques des échantillons ciments selon la norme européenne (EN 196-1).
- Résistances à la traction par flexion et la compression sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (4x4x16) cm³.

notre étude sera donc répartie en quatre chapitres, initiés par une recherche bibliographique où nous apportons dans le premier chapitre une généralités sur le ciment (leur fabrication, composition et classification), puis nous avons présenté dans la deuxième partie de ce chapitre, plus de détail sur le clinker comme composant principal dans les matériaux cimentaire, ainsi que les facteurs qui peuvent influencer les performances et composition chimique du clinker.

Le deuxième chapitre présente les principales analyses physico-chimiques pour surveiller le produit selon les normes européennes (EN 196-1).

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude expérimentale, où les essais expérimentaux réalisés au cours de notre travail de recherche sont présentés avec leurs modes opératoires selon les normes internationales.

Le quatrième chapitre est consacré à la discussion des différents résultats expérimentaux obtenus.

Enfin, une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus.

Chapitre I

Etude Bibliographique

I. 1. Historique

Pendant la préhistoire et au début de l'Antiquité, on utilisait l'argile comme liant pour maçonner les pierres. Lors de la construction des pyramides, les Égyptiens utilisèrent un plâtre obtenu par cuisson d'un gypse. Plus tard, les Grecs, puis les Romains, se servirent de la chaux produite par la cuisson du calcaire, dans leurs constructions. À partir du 1^{er} siècle av. J.-C., ils améliorèrent le liant en y ajoutant des pouzzolanes, particules très fines d'origine naturelle, comme les cendres volcaniques, ou artificielles, comme la poussière de briques broyées. Ils obtinrent ainsi le ciment romain. Ce liant fut utilisé sans grandes modifications jusqu'en 1756, date à laquelle l'Anglais Smeaton, lors de la construction du phare d'Eddy stone, mélangea des chaux hydrauliques et des pouzzolanes. Il obtint ainsi le premier liant artificiel, avec lequel il prépara un mortier aussi dur que la pierre de Portland.

En 1817, l'ingénieur français Louis Vicat, suivi, au début des années 1820, par Treussart, ainsi que par Pavin de Lafarge, découvrit et définit les formules des ciments actuels, préparés alors dans des fours verticaux. Les fours rotatifs firent leur apparition vers 1880 et sont toujours utilisés. À l'heure actuelle, les cimentiers, qui sont généralement équipés de laboratoires de recherche, cherchent à mettre au point des ciments de plus en plus performants. [1]

I. 2. Définition du ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le ciment gâché et mélangé avec des granulats et de l'eau de façon appropriée, doit être capable de produire un mortier ou un béton qui conserve une ouvrabilité pendant un temps suffisamment long et doit, après des périodes déterminées, atteindre des niveaux de résistance donnés et aussi présenter une stabilité de volume à longue échéance .

Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation de silicates de calcium, mais d'autres composés chimiques peuvent également intervenir dans le processus de durcissement, tels que, par exemple, les aluminates. La somme des proportions d'oxyde de calcium (CaO) et de dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse, dans les ciments.

Les ciments sont constitués de petits grains individuels de différentes matières, mais ils doivent être statistiquement homogènes en composition. Un haut degré de régularité dans toutes les propriétés du ciment est obtenu par un procédé continu de production en masse et, en particulier, par des procédés convenables de broyage et d'homogénéisation. [2]

I. 3. Constituants de base du ciment

I. 3. 1. Matières premières

Les matières premières sont nécessaires à la fabrication du ciment sont le calcaire et l'argile. Ces matériaux sont extraits par détonation, et ils sont transportés par des bulldozers et de gros camions vers le concassage pour les transformer de grosses roches en pierres de petit diamètre.

I. 3. 1. 1. Calcaire

Le calcaire est essentiellement constitué de carbone de calcium qui existe à l'état pur sous de variétés cristallisées de calcite et d'aragonite. On classe les calcaires comme suit :

a. Calcaire Dur : On attribue ce nom au calcaire contenant un minimum de 80% en CaCO_3 et maximum de MgCO_3 . Le calcaire dur, renferme de faible proportion d'impureté de quartz, d'oxyde de fer. Les calcaires durs sont imperméables à l'eau.

b. Calcaire Mou (Craie) : La craie exploitée, par exemple, s'est formée il y a 80 millions d'années par l'accumulation de coquilles de plancton appelés coccolites. Les précipitations de (CaCO_3) ont cimenté ces organismes entre eux avec un peu d'argile et de silice. Le calcaire mou contient un maximum de 90% en (CaCO_3). Il est une variété de calcaire friable, les impuretés sont en proportion secondaires. [3]



Figure I.1 : Grain du calcaire

I. 3. 1. 2. Argile

Elles sont constituées surtout de minéraux très petits à structures en feuilles ceci explique leur tendance à absorber l'eau et leur plasticité. Il y a une nombreuse variété de minéraux aux formes très complexes les plus connues sont :

L'argile est une roche de couleur variable suivant les oxydes qu'elle contient. Lorsqu'elle est humide, elle dégage l'odeur caractéristique de la terre mouillée, elle se disperse facilement dans l'eau à cause du gonflement de ses particules de liaisons entre elle, et à cause de sa plasticité.

Les argiles sont des produits composés de roches siliceuses principalement de feldspaths qui sont des silicates doubles d'aluminium et d'un métal alcalin ou alcalinoterreux. [3]



Figure I.2 : Argile

I. 3. 2. Les matières corrections

Des correcteurs, minerai de fer qui apporte Fe_2O_3 , bauxite pour Al_2O_3 , calcaire pour CaO , sable pour SiO_2 sont ajoutés pour atteindre la composition souhaitée du cru et le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) qui est un retardateur de prise est broyé avec le clinker. [4]

I. 3. 2. 1. Minerai de fer (Fe_2O_3)

Le minerai de fer est une roche contenant du fer, généralement sous la forme d'oxydes, comme la bauxite.

Les minerais de fer ont une teneur en fer variable selon le minéral ferrifère, sachant également que l'isomorphisme, presque toujours présent dans les minéraux naturels, réduit la teneur théorique. [5]



Figure I.3 : Minerais de fer

I. 3. 2. 2. Sable

Elle se présente sous plusieurs formes :

a. Libre : elle ne peut se combiner et doit être éliminée si elle apparaît en nodules de silex ou de quartz, il peut en être autrement si elle se trouve finement divisée à l'état naturel et répartie dans la masse de calcaire.

b. Combinée : divers éléments tel que le fer, la magnésie, l'alumine, la silice et l'alumine déjà combinée sous forme d'argile réagissent bien avec la chaux. [6]



Figure I.4 : Grain de sable

I. 3. 2. 3. Bauxite

Est une roche latéritique blanche, rouge ou grise, caractérisée par sa forte teneur en alumine Al_2O_3 et en oxydes de fer. Cette roche constitue le principal minerai permettant la production d'aluminium. Elle se forme par altération continentale en climat chaud et humide. De structure variée, elle contient dans des proportions variables des hydrates d'alumine, de la kaolinite, de la silice et des oxydes de fer qui lui confèrent souvent une coloration rouge. [4]

I. 3. 2. 4. Gypse

Le gypse est une espèce minérale composée de sulfate di hydraté de calcium de formule $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. Le mot gypse désigne ainsi à la fois une espèce chimique et H une roche. La Mine de Naica permet de voir des cristaux géants de ce minéral dépassant 11 mètre de long (**Figure I.5**) Le gypse est le minerai qui permet de fabriquer le plâtre. [7]



Figure I.5 : Grain de gypse

I. 3. 3. Les matières secondaires

I. 3. 3. 1. Pouzzolane

Le terme couvre une série de matières naturelles de produit naturels caractérisés par une forte teneur en silice (50%) et l' aptitude à fixer la chaux en présence de l' eau à la température ambiante, pour formes des silicates et aluminates de calcium hydratés.

En association avec un ciment portland (ciment dégagement beaucoup de chaux hydratée lors de processus d' hydratation) la pouzzolane agit en fixant progressivement cette chaux.

Ce faisant, elle accroît à long terme la résistance mécanique et améliore le comportement aux agents agressifs par la réduction de teneur en chaux libre.

En outre, la poudre très fine que constitue la pouzzolane, améliore l'imperméabilité en colmatant les capillaires. [3]

On distingue deux types de pouzzolane :

a. Pouzzolane naturelle

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolanique. Elles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25 %) d'alumine et d'oxyde de fer. [16]



Figure I.6 : Grains de pouzzolane.

b. Pouzzolane artificielle

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composées de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets des efférentes industries on distingue. Soit des résidus de fabrication industrielle tel que le mach fers , cendre de bois ou d'houille soit des débris de brique et de tuile fabriquées avec des argile pures des températures modérées . [36]

I. 3. 3. 2. Les fillers calcaires

Les fillers calcaires sont des produits finement divisés. Obtenus par broyage des roches naturelles (calcaires, basalte, etc.), avec une teneur de carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75%.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de CaCO_3 , sinon il est désigné par le nom de sa roche d'origine.

Dans le commerce, les fillers sont désignés comme des poudres très fines à granulométries contrôlées, les plus gros grains ne dépassent pas 80 µm.

Les fillers se différencient les uns des autres par : leur origine (roche), leur composition chimique et minéralogique, la forme des grains, leur finesse, leur dureté, et porosité, ainsi que les impuretés qu'ils contiennent. [28]

I. 3. 3. 3. Fumées de silice

Elles sont issues de la production de silicium métallique dans les fours à arc électrique. Elles forment des sphéricités qui se regroupent en agglomérats de quelques micromètres. La surface spécifique de ces fines est très élevée (10 à 20 m²/g). [8]

I. 3. 3. 4. Le laitier de haut fourneau

Le laitier est des sous-produits de l'industrie métallurgique. Leur composition chimique comporte de l'oxyde de calcium (40 à 50%), silice (25 à 35 %), l'alumine (12 à 30 %) ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faible quantité. [29]

I. 3. 4. Produit semi-fini (Clinker)

Le clinker est un mélange de calcaire CaCO₃ (~80 %) et d'argile (~20 %) ayant subi une cuisson à 1450 °C au sein d'un long four métallique isolé par des briques réfractaires.

Le clinker obtenu à la sortie du four à la suite de la cuisson des matières premières constituées principalement de calcaire, d'argile et de matières de correction, est un matériau hydraulique se présentant sous la forme de petits nodules très durs . [21]

I. 4. Procédure de fabrication du ciment

I. 4. 1. Principe de fabrication

La fabrication de ciment, Elle est basée sur trois opérations suivantes :

-  Préparation de cru
-  Cuisson
-  Broyage et conditionnement

I. 4. 2. Procèdes et technique de fabrication

I. 4. 2. 1. Procèdes de fabrication

Il y a quatre méthodes de fabrication existe dans milieu cimenterai sont :

A. Procédé par voie humide (plus ancienne)

Cette voie est utilisée depuis longtemps, la plus simple mais qui requiert le plus d'énergie. Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont broyés finement et mélangés avec l'eau de façon à constituer une pâte assez liquide (environ 42 % d'eau). On brasse énergiquement cette pâte dans de grands bassins de 8 à 10 mètres de diamètres. Elle est continuellement malaxée et homogénéisée, ce mélange est appelé le cru. Des analyses chimiques permettent de contrôler et d'apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson. La pâte est ensuite acheminée à l'entrée d'un four rotatif. Le clinker, à la sortie du four, passe dans des refroidisseurs pour subir une trempe.

Quelle que soit la méthode de fabrication, à la sortie du four, on obtient un même clinker qui est encore chaud. [30]

B. Procédé par voie semi-humide

Dans la voie semi-humide, la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres presses. Le gâteau de filtre-presse est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru. [31]

C. Procédé par voie semi-sèche

Dans la voie semi-sèche, la farine mélangée à de l'eau forme des granules qui sont introduites dans un préchauffeur à grilles situé en amont du four ou dans un four long équipé de croisillons. [31]

D. Procédé par voie sèche (plus utilisée)

La matière première broyée et séchée passera d'abord dans un préchauffeur à cyclone avec ou sans précalcinateur (de type AT 'air- through' ou AS 'air séparé'), puis dans un four tubulaire de 80 m. C'est le procédé le plus récent et le plus répandu car il est moins énergivore, mais il nécessite la mise en œuvre de moyen importants de captation des poussières (électro filtres, filtres cyclones et multi cyclones, dépoussiéreurs électrostatiques...). [14]

I. 4. 3. Technique de fabrication

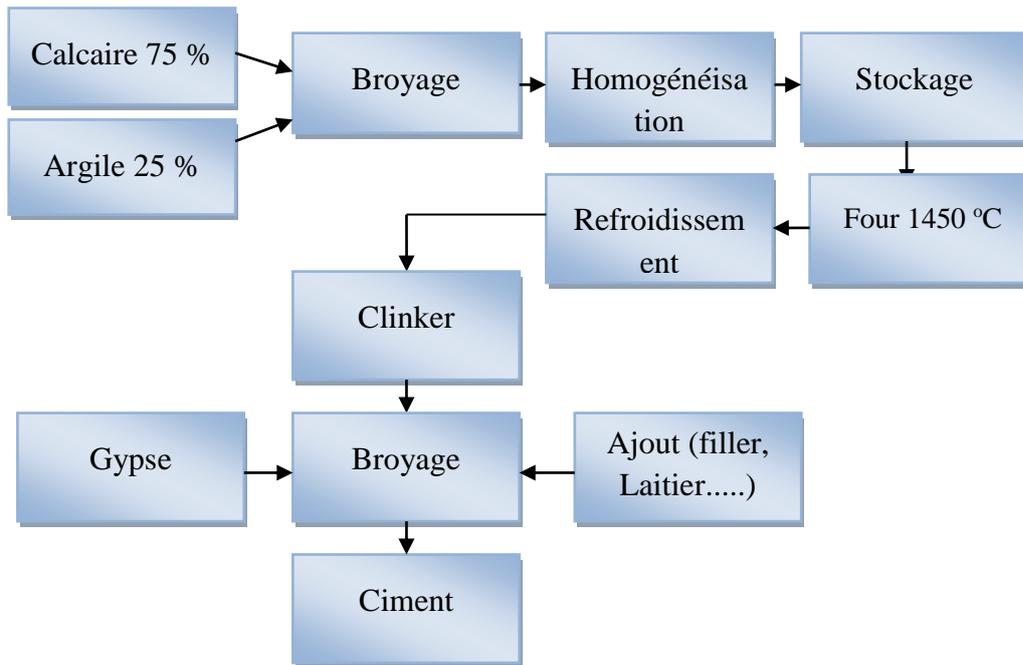


Figure I.7 : Organigramme de la chaîne de fabrication du ciment Portland

I. 4. 3. 1. Extraction

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert. Pour produire des ciments de qualités constantes, les matières premières doivent être très soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière dans le temps. [10]



Figure I.8 : Extraction la matière première

I. 4. 3. 2. Concassage

Le concassage, fait sur les lieux de l'extraction, réduit la granulométrie des matériaux à environ 25mm. [11]



Figure I.9 : Concasseur

I. 4. 3. 3. Pré-homogénéisation

La matière première est étendue en couches horizontales successives, qui finissent par former un tas, dont la composition globale est celle désirée. Les couches sont ensuite reprises verticalement, ce qui permet de prélever en permanence une matière de composition identique.



Figure I.10 : Hall de pré-homogénéisation

La matière crue est reprise dans les tas de pré-homogénéisation par des roues-pelles la pré-homogénéisation de la matière première se fait à l'aide d'un bras râteau, tournant autour d'un axe dans un hall. [4]



Figure I.11 : La technique de la pré-homogénéisation

I. 4. 3. 4. Broyage du cru

Le but de broyage est Conversion de grosses particules en poudre.

Après avoir déterminé par une consigne la teneur des différents composants, les trémies doseurs envoient le mélange obtenu dans le broyeur vertical par une bande de transport. La farine, dont le principe d'obtention (le broyage). [12]



Figure I.12 : Broyeur cru

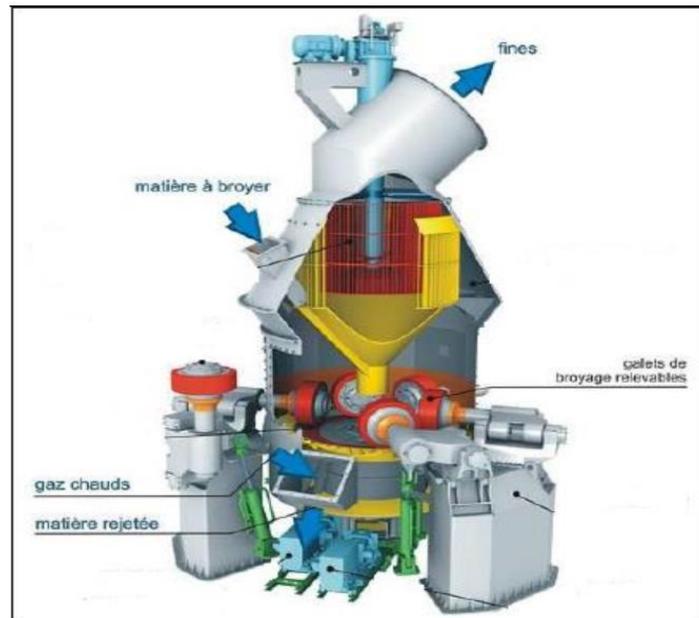


Figure I.13 : dessin du broyeur cru vertical

I. 4. 3. 5. Filtration (Séparation Gaz-matière)

Avant le stockage passant par quatre cyclones pour séparer la matière crue du gaz et poussière.

I. 4. 3. 6. Stockage et Homogénéisation

Dans le silo, deux types de processus se produisent, qui sont un bon mélange la matière crue et un stockage.

I. 4. 3. 7. Préchauffage

La tour de préchauffage est équipée de cinq étages de cyclones qui permettent de préchauffer la matière à environ 800°C, de la déshydrater car la farine (autre nom donné à la matière) tombe par gravité tandis que les gaz remontent la tour pour se diriger vers le filtre. [15]

I. 4. 3. 8. Four rotatif

Une fois le cru préparé, il sera acheminé directement à l'entrée du four, qui est souvent constitué d'un grand cylindre d'environ 3 à 6m de diamètre et de 50 à 150m de longueur, incliné par rapport à l'horizontale de 3 à 5% de façon à permettre une descente progressive des matières en rotation autour de son axe. La partie inférieure du four est équipée d'une flamme entretenant une température de l'ordre de 1450°C ; en s'approchant de

cette zone, le cru subi des transformations successives qui le conduisent au produit fini qui est le clinker. [13]



Figure I.14 : Four rotatif et préchauffage

I. 4. 3. 9. Refroidisseur

A la sortie du four, le clinker tombe sur une grille de refroidissement rapide à travers laquelle est soufflé par l'air froid (la trempe). Le refroidissement après cuisson joue un rôle important sur la forme et la réactivité des constituants du clinker. [13]

I. 4. 3. 10. Stockage du clinker

Après refroidissement, de clinker se présente sous la forme de grosses pierres et est dirigé vers le silo par tapis métallique pour stockée le clinker.



Figure I.15 : Silo du clinker

I. 4. 3. 11. Broyage du clinker

Le clinker additionnée de gypse (retardateur de prise) et éventuellement d'ajouts (calcaire, pouzzolane) sont broyés de manière à obtenir des particules de taille plus fines. Les modes de broyage utilisés en cimenterie sont adaptés au caractère dur, et abrasif du clinker. [11]



Figure I.16 : Broyeur du ciment

I. 4. 3. 12. Stockage du ciment

Après le broyage de clinker, gypse et ajout est dirigé le produit fini vers le silo de stockage.

I. 4. 3. 13. Ensachage et expédition

Le produit est commercialisé de deux manières en sacs et en vrac.



Figure I.17 : expédition en sac



Figure I.18 : expédition en vrac

I. 5. Classification normalisée des ciments

Selon que des constituants, autres que le gypse, sont ou non ajoutés au clinker lors des opérations de fabrication, on obtient les différents types de ciments définis par la norme. Le tableau ci-dessous donne la liste des différents types de ciments courants normalisés avec indication, pour chacun d’eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs de constituants qu’ils comportent. [14]

Tableau I.1 : Principales catégories de ciment

Désignations	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en % de l’un des constituants suivants : laitier -pouzzolanes - cendres - calcaires -schistes -fumées de silice	Teneur en Constituants secondaires
CPA- CEM I	Ciment Portland	95 à 100%		0 à 5 %
CPJ- CEM II/A	Ciment Portland composé	80 à 94 %	De 6 à 20 % de l'un quelconque des constituants, sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10 % ;	0 à 5 %
CPJ- CEM II/B		65 à 79 %	de 21 à 35 % avec les mêmes	0 à 5 %

			restrictions que ci-dessus.	
CHF- CEM III/A	Ciment de haut fourneau	35 à 64%	36 à 65 % de laitier de haut fourneau.	0 à 5 %
CHF- CEM III/B		20 à 34 %	66 à 80 % de laitier de haut-fourneau.	0 à 5 %
CLK- CEM III/C		5 à 19 %	81 à 95 % de laitier de haut-fourneau.	
CPZ- CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	10 à 35 % de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10 %.	0 à 5 %
CPZ- CEM IV/B		45 à 64 %	36 à 55 % comme ci-dessus.	0 à 5 %
CLC- CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	18 à 30 % de laitier de haut fourneau et 18 à 30 % de cendres siliceuses ou de pouzzolanes.	0 à 5 %
CLC- CEM V/B		20 à 39 %	31 à 50 % de chacun des 2 constituants comme ci-dessus.	0 à 5 %

I. 6. Le clinker

I. 6. 1. Définition de clinkerisation

Le clinker est un produit intermédiaire dans la fabrication du liant hydraulique. Au moyen d'un traitement thermique simple, un mélange de minéraux naturels non hydrauliques (calcite, quartz, argiles et feldspaths) est transformé en mélange intime de minéraux actifs hydrauliquement, alite, bélite, aluminat et ferrite, appelé clinker. Tout comme d'autres produits tels que les céramiques, briques, etc., le clinker peut être considéré comme étant une roche produite synthétiquement. Le traitement thermique de chauffage et de refroidissement, responsable de cette "métamorphose", est appelé "Clinkérisation". [21]

I. 6. 2. Composition chimiques du clinker

De la composition chimique des matières premières et de leurs proportions dans le mélange, on déduit la nature des éléments chimiques présents dans le ciment portland et leurs concentrations. [17]

Les compositions chimiques du clinker sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau I.2 : Les compositions chimiques de clinker

Oxydes	Nom en cimenterai	Symboles
CaO	Chaux	C
SiO ₂	Silice	S
Al ₂ O ₃	Alumine	A
Fe ₂ O ₃	Ferrite	F
MgO	Magnésie	Mg
Na ₂ O	Oxyde de sodium	Na
K ₂ O	Oxyde de potassium	K
SO ₃	Trioxyde de soufre	Š
Cl	Chlorure	Cl
CO ₂	Le dioxyde de carbone	Č

I. 6. 2. 1. Les compositions chimiques majeures

a. Chaux (CaO) : Il est lié avec SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, à l'état libre il provoque une inégalité de changement de volume du ciment lors de l'hydratation.



La résistance du ciment augmente en cas d'augmentation du pourcentage de CaO lié, cependant, la stabilité chimique diminue en milieu agressif. La teneur de CaO est de 63% à 67% dans le clinker. [17]

b. Silice(SiO_2) : Il réagit avec CaO en donnant les silicates de calcium ; un pourcentage élevé donne beaucoup de C_2S parce qu'il réagit avec tout le CaO, dans ce cas le ciment durcit lentement, sa résistance augmente à long terme.

L'augmentation de C_2S donne une grande durabilité au ciment surtout au milieu agressif, sa teneur est de 21% à 24%. [17]

c. Alumine(Al_2O_3) : Il contribue à la prise et au durcissement rapide du ciment, cependant, une haute teneur en Al_2O_3 donne un ciment très sensible à la corrosion sulfatée, sa teneur est de 4 à 7%. [17]

d. Ferrite(Fe_2O_3) : Il joue le rôle de fondant, il diminue considérablement la température de cuisson du clinker, il contribue à l'augmentation de la stabilité chimique dans les eaux sulfatées, sa teneur est de 2,5% à 4%. [17]

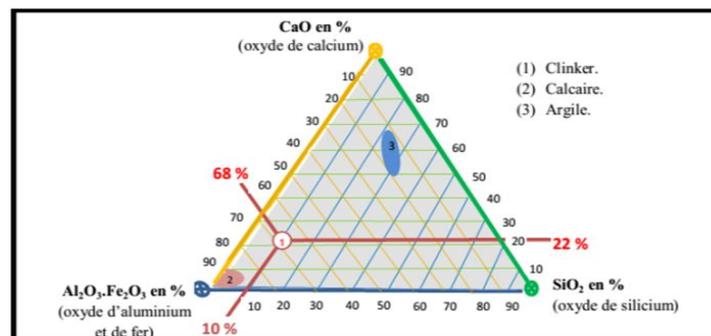


Figure I.19 : les pourcentages des compositions chimiques principales en clinker

I. 6. 2. 2. Les compositions chimiques mineures

a. Magnésie (MgO): L'oxyde de magnésium dont la teneur est aux environs de 2% mais se trouve en liaison avec les principales phases du clinker et à l'état libre. Le MgO qui existe en solution solide dans la phase vitreuse qui se forme lors d'un refroidissement brusque du clinker n'est pas dangereuse. Au contraire, le MgO cristallisé « periclase » se trouve à l'état libre et dangereux pour les ouvrages du fait de son expansion ultérieure. [6]

b. Alcalis (Na_2O et K_2O): Sont introduits dans le four avec l'argile, la marne et les poussières provenant des filtres en cas de récupération. Pendant la cuisson, dans le four rotatif, une partie des alcalis se volatilise dans la zone clinkérisation et donne naissance à la circulation alcaline. [6]

c. Soufre: Le soufre du clinker provient essentiellement du combustible tel que le coke ou le charbon et des matières premières comme l'argile et le schiste où il se manifeste sous forme de pyrite, de sulfate ou de composé organique. La présence de soufre réduit la volatilité des alcalis pendant le clinkerisation. [26]

d. Chlorure: Le mélange des matières premières contient souvent 0,01 à 0,1% de chlorures et dans des cas exceptionnels jusqu'à 0,3% Les sels de chlorures LiCl, KCl, NaCl, CaCl₂ intensifient le processus de décomposition des matières premières, abaissent la température de dissociation du CaCO₃ et la synthèse des silicates et aluminates de calcium. Leur action est forte: 600°- 650°C, formation complexe CaCO₃. CaCl₂. [6]

I. 6. 3. Les compositions minéralogiques du clinker

Ces nodules comportent quatre phases cristallines synthétisées lors de la cuisson par notation cimentière :

a. Silicate tricalcique également dénommé (alite), C₃S dont la formule chimique est 3CaO, SiO₂.

b. Silicate bi-calcique ou (bélite), C₂S, de formule chimique est 2CaO, SiO₂.

c. Aluminates tricalciques ou (célite) C₃A, de formule chimique est 3CaO, Al₂O₃.

d. Ferro-aluminates tétra-calcique C₄AF, de formule chimique est 4CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃. [4]

I. 6. 3. 1. Les compositions minéralogiques majeures

a. Silicate tricalcique C₃S: Le silicate tricalcique (C₃S) présenté sous le nom d'alite est le minéral le plus important et le composé le plus actif du ciment Portland. C'est une solution solide renfermant de nombreux éléments étrangers dans des proportions variables tels que: Al, Mg, Fe, K, Na. (**Figure I.20**) illustre une vue microscopique de ce composé. [18]

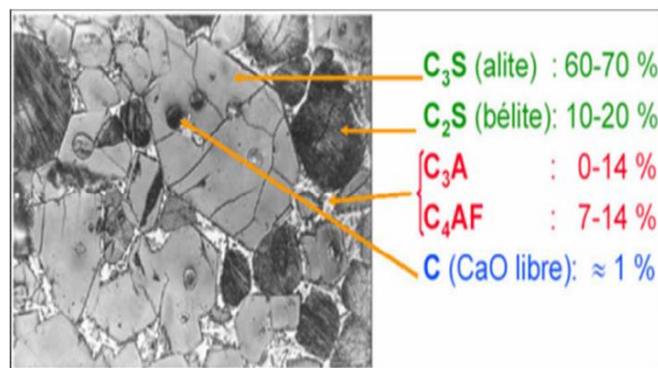


Figure I. 20: Micrographie de clinker montrant ses quatre phases cristallines principales

b. Silicate bicalcique C_2S : Le C_2S constitue entre 15 et 30% du ciment Portland. Les cimentiers le désignent par bélite qui est une forme impure de C_2S . Dans le C_2S , on retrouve, en plus du potassium, les mêmes ions étrangers que dans le C_3S , mais ils y sont en plus grande quantité. La bélite fournit au ciment sa résistance à long terme.

Il existe au moins quatre variétés polymorphiques de C_2S (α , α' , β , γ) et leur domaine de stabilité est différent selon le chauffage et le refroidissement. La forme β est celle que l'on rencontre le plus souvent dans les clinkers industriels. Lors d'un refroidissement lent, la forme β peut se transformer en γ qui n'a aucune propriété hydraulique. Contrairement au C_3S , les propriétés hydrauliques du C_2S varient considérablement selon la variété polymorphique. [19]

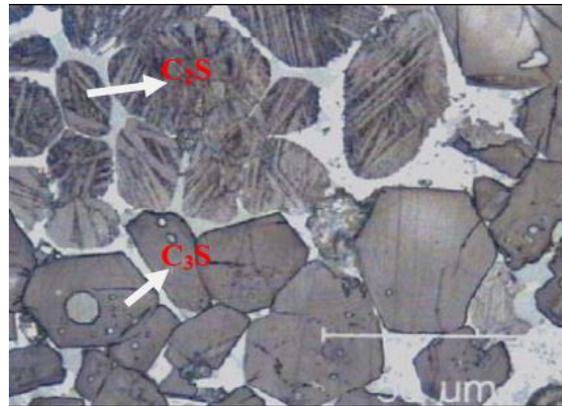


Figure I. 21 : Image de C_3S et C_2S sous microscope optique

c. Aluminate tricalcique, C_3A : Le C_3A , qui représente de 5 à 10% de la composition du ciment Portland, est la phase du clinker dont la vitesse de réaction initiale est la plus importante. Dans les clinkers, la présence d'alcalis (surtout le sodium) modifie la symétrie cristalline du C_3A . Ainsi, selon la quantité totale d'alcalis dissous dans le réseau cristallin, le C_3A peut être cubique, orthorhombique ou monoclinique. Généralement dans le ciment, le C_3A est toutefois un mélange des formes cubique et orthorhombique, mais rarement monoclinique. Le C_3A orthorhombique stabilisé par la présence de sodium est moins réactif que le C_3A cubique. [19]

d. Aluminoferrite tétracalcique, C_4AF : C'est une solution solide d'aluminoferrite tétracalcique, de structure cristalline orthorhombique ; les ions de fer et d'aluminium se répartissent dans le site octaédrique des solutions solides. Ce composé ne contribue pas aux résistances, il existe dans la phase interstitielle du clinker. Le clinker se compose

essentiellement des solutions solides (alite et bélite), qui lui confèrent les résistances mécaniques, et des solutions solides de C_3A et C_4AF qui occupent la phase interstitielle. [18]

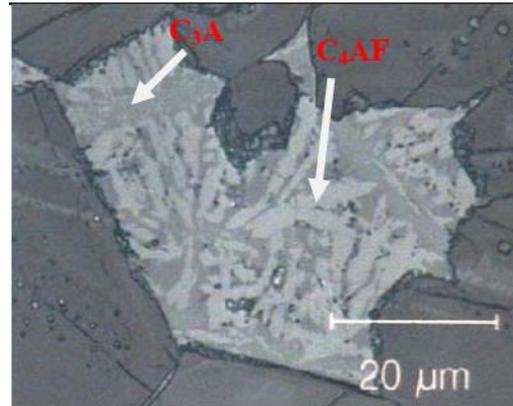


Figure I. 22 : Image de C_3A et C_4AF sous microscope optique

I. 6. 3. 2. Les compositions minéralogiques mineures

a. La chaux libre (CaO_L): L'oxyde de calcium se forme dans les agglomérations générales de particules rondes. Deux types d'oxyde de calcium peuvent être distingués dans le clinker. Chaux libre primaire qui n'a pas réagi avec les autres composants en raison d'erreurs dans la préparation du mélange brut. [25]

c. Sulfates alcalins: Les oxydes alcalins vont former des sulfates alcalins par association avec les sulfates présents dans les matières premières lors de la fusion partielle du mélange. Leur pourcentage peut être abaissé par une augmentation de la température ou de la durée de cuisson, ou encore par ajout d'un mélange de chlorure de calcium. Ils sont en général localisés à la surface des autres phases du clinker et vont ainsi passer en solution lors du mélange du ciment avec l'eau. [27]

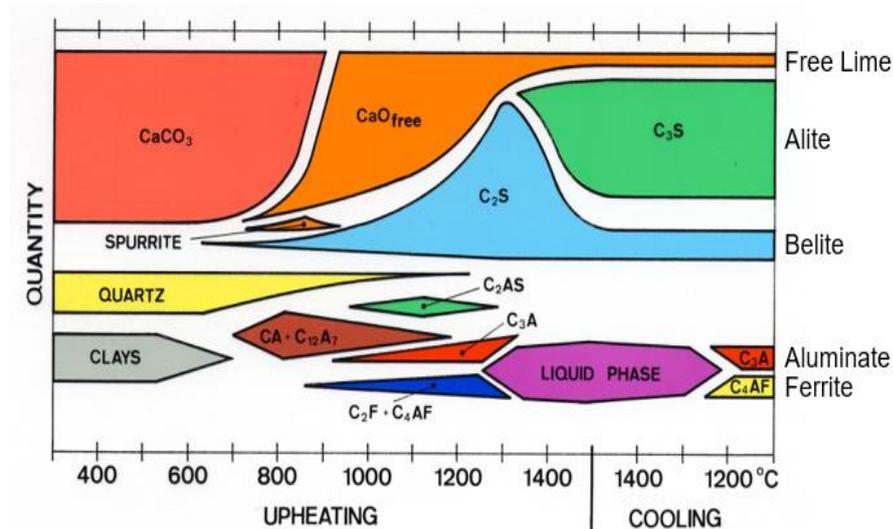


Figure I.23 : Les phases de clinker

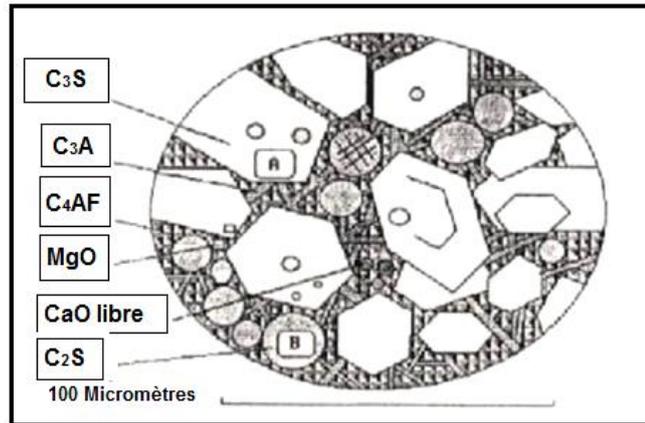


Figure I.24 : Dessin représentant les minéraux observables au microscope optique d'un grain de clinker

I. 6. 4. Les formules de bogue

Les formules de bogue sont utilisées en mondial pour calculer les phases minéralogiques du clinker (C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF) dépendent les oxydes principaux (C, A, S, F,) par les équations suivantes :

1. $C_3S = 4.071 - (C \% - C_L \%) - 7.60 S\% - 6.718 Al\% - 1.430 Fe\%$
2. $C_2S = 8.60 Si\% + 5.068 Al\% + 1.079 Fe\% - 3.071(C \% - C_L \%)$
3. $C_3A = 2.650 Al\% - 1.692 Fe\%$
4. $C_4AF = 3.043 Fe\%$

I. 6. 5. Performances et composition chimique du clinker

La qualité finale est évaluée par des modules, c'est-à-dire des valeurs calculées à partir de la composition.

I.6. 5. 1. Facteur de saturation en chaux

Le facteur de saturation en chaux (lime saturation factor- LSF) est calculé par l'équation suivante : [20]

$$LSF = \frac{C \%}{(2.8x S\%) + (1.18xA\%) + (0.65xF\%)}$$

I.6. 5. 2. Module silicique

Le module silicique permet de contrôler la proportion de phases silicatées dans le mélange par rapport aux phases interstitielles alumineuses et ferreuses. Cela a une importance capitale dans la facilité à cuire le mélange. Plus le module silicique est élevé,

plus le mélange est difficile à cuire du fait de la richesse en silice et de la faible teneur en liquide assurant les processus de diffusion à l'origine des réactions solide-liquide et liquide-liquide. [37]

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

I. 6. 5. 3. Module alumino-ferrique

Le module alumino-ferrique (MAF) contrôle principalement la viscosité de la phase liquide et la cinétique de formation de C3A jusqu'à 1338°C. L'augmentation du MAF conduit à une augmentation du % de la phase liquide. [38]

$$MA = \frac{A\%}{F\%}$$

I. 6. 5. 4. Module cuvalle

Le module de cuvalle (Q_v) est un paramètre indiquant l'état de clinker.

$$Q_v = \frac{\frac{SO_3\%}{M_{SO_3}}}{\frac{K_2O\%}{M_{K_2O}} + \frac{Na_2O\%}{M_{Na_2O}} - \frac{Cl\%}{M_{Cl}}}$$

I. 6. 6. Processus de la cuisson du clinker

La cuisson du clinker passe par plusieurs étapes :

- A. Séchage
- B. Préchauffage
- C. Calcination
- D. Refroidissement

I. 6. 6. 1. Séchage

Les matières premières sont séchées à l'air chaud pour déshydrater l'eau à la surface des particules, la température peut atteindre 100°C.

I. 6. 6. 2. Préchauffage

Avant introduction dans le four, la farine (le cru) est chauffée à environ 800 °C dans un préchauffeur à grille ou à cyclones appelé échangeur de chaleur. Un échangeur de chaleur comportant une série de quatre à cinq cyclones dans lesquels la poudre déversée à la partie supérieure descend vers l'entrée du four rotatif. La matière froide, introduite dans la partie

supérieure, se réchauffe au contact des gaz circulant à contre-courant. D'étage en étage, elle arrive partiellement décarbonatée, jusqu'à l'étage inférieur, à la température d'environ 800 °C. [23]

a. $T \geq 100^{\circ}\text{C}$: Evaporation de l'eau constitutive à l'intérieur des minéraux.

b. $T \geq 600^{\circ}\text{C}$: Décomposition des matières argileuses. (SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3) et décarbonatation de magnésie.

c. $T \geq 850^{\circ}\text{C}$: Décarbonatation du calcaire.

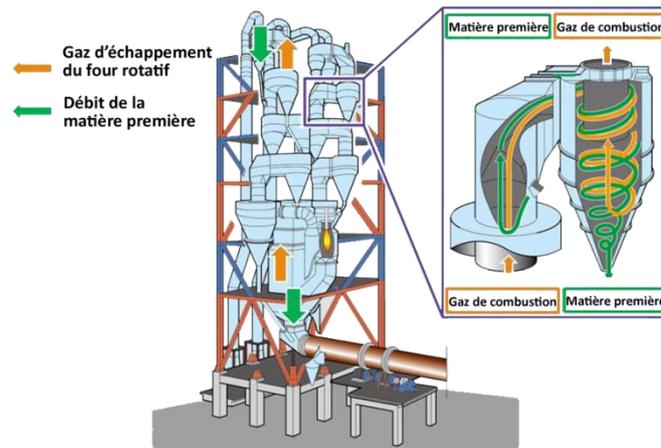


Figure I.25 : Les cyclones

I. 6. 6. 3. Calcination

Une fois préchauffée et décarbonatée, la farine "cru" entre dans le four rotatif et progresse jusqu' à la zone de clinkerisation (à environ 1450 °C). Le temps de parcours est de l'ordre d'une heure.

À partir de 850 °C, le carbonate de calcium du calcaire subit une décarbonatation ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). On obtient alors de la chaux vive (CaO) accompagnée d'un important dégagement gazeux (CO_2).

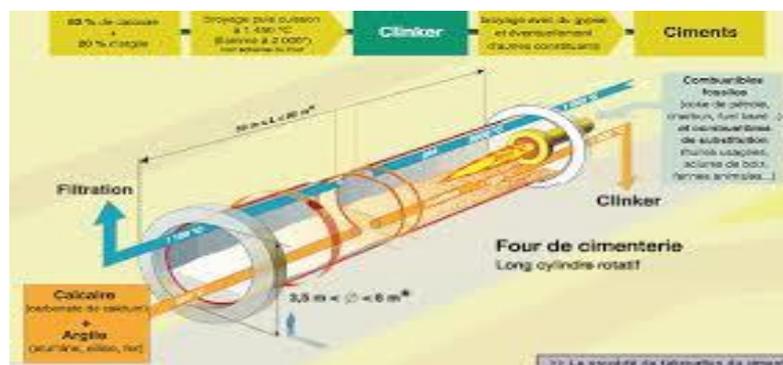


Figure I.26 : Schéma indiquant le processus pour l'obtention du clinker

Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile, principalement composée de silicates (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxydes de fer (Fe_2O_3), se combinent à la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et des aluminates de calcium pour former les nouveaux composés chimiques qui entrent dans la composition minéralogique du clinker.

Alors, le processus de calcination est suivi de la cuisson du clinker ou clinkérisation pendant laquelle l'oxyde de calcium réagit à haute température (en général entre 1400 et 1500 °C) avec la silice, l'alumine et l'oxyde ferreux pour former des silico-aluminates de calcium composant le clinker. (**Figure I.24**) montre un schéma indiquant la cuisson du clinker (clinkerisation). Alors, à partir de 1400 °C les réactions de clinkérisation se produisent.

Ces deux composés nouvellement formés constituent la phase liquide du mélange. Celui-ci progresse vers la partie la plus chaude du four. La silice (SiO_2) et la chaux (CaO) réagissent entre-elles : La silice (SiO_2) et la chaux vive (CaO) produisent du silicate de calcium (Ca_2SiO_4).

S'il reste de l'oxyde de calcium (CaO) qui n'a pas encore réagi, la réaction peut se poursuivre : Le silicate bicalcique (Ca_2SiO_4) et la chaux vive créent (CaO) du silicate tricalcique (Ca_3SiO_5). [22]

I. 6. 6. 4. Refroidissement

Le clinker sort du four à une température supérieure à 1350°C, le passage dans le refroidisseur à plusieurs fonctions. C'est un appareil qui a pour but de tremper et refroidir le clinker, récupérer des thermies pour l'air de combustion et éventuellement un broyeur cru ou charbon. Le refroidisseur est un échangeur thermique. [24]

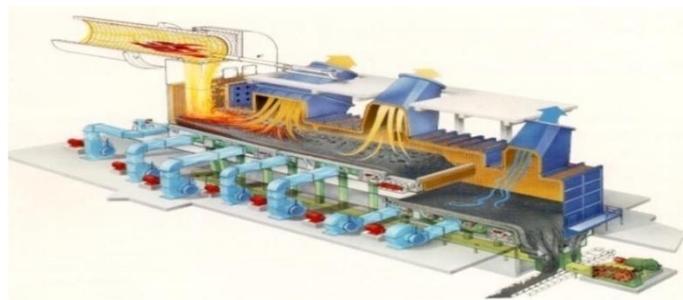


Figure I.27 : Opération du refroidisseur

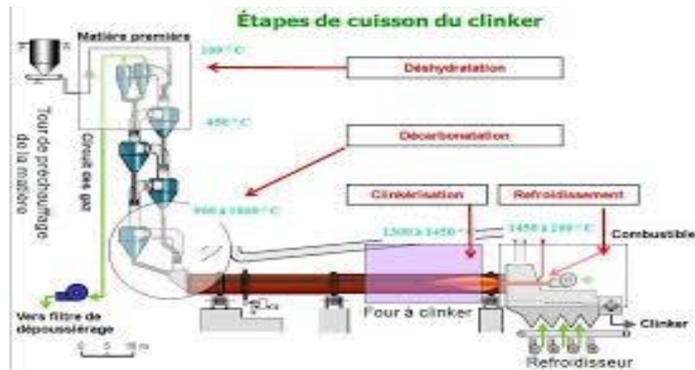


Figure I.28 : Les étapes de cuisson du clinker

Chapitre II

Méthodes des analyses et contrôles de qualité

II. 1. Principe de laboratoire

Le travail dans le laboratoire, consiste à contrôler la qualité de produit tout au long du processus de la fabrication depuis les matières premières jusqu'à le produit final. En emportant des échantillons à analyser pour connaître les compositions existantes et leurs pourcentages.

Les différentes analyses effectuées en laboratoire sont les suivantes :

- a. Contrôle de la matière crue chaque 2 heures
- b. Contrôle de clinker chaque 2 heures
- c. Contrôle de ciment chaque 2heures
- d. Contrôle d'alimentation de four 3 fois / jour
- e. Contrôle de matière chaud 3 fois / jour
- f. Contrôle de matières premières 1 fois / semaine

II. 2. Méthodes chimique

Les méthodes analyse chimique utilisées au niveau de la cimenterie de CILAS, sont effectués selon la norme européenne «196-2 »:

II. 2. 1. Détermination de la chaux libre (CaO_L)

Les matériaux utilisés dans cette analyse sont le ciment et clinker.

II. 2. 1. 1. La méthode référence

Introduire 2g d'échantillon à analyser, dans un bécher sec de 100 ml. On l'ajoute 25 ml d'éthylène glycol, et on agite la solution pendant 30 sec, puis le bécher est placé dans l'étuve à environ de 110°C , pendant 10min.

La solution est filtrée dans l'ensemble de filtration sous vide, la fiole doit préalablement contenir : 200 ml d'eau déminéralisée, 5 ml de HCl et quelques gouttes d'indicateur de méthylorange, on ajoute 4 ml d'ammoniaque et ajoute la solution de NaOH (2N) jusqu'à l'obtention d'un $\text{pH} = 13,0 \pm 0,5$, On verse ensuite 15 ml de triéthanolamine.

Le réactif de calconcarboxylique jusqu' à l'obtention d'une franche coloration rose violacé.

On titre avec E.D.T.A (éthylène diamine tétra acétique) jusqu'au la disparition complète de la couleur bleu turquoise consignez la valeur V_{EDTA} . [39]

$$\%CaO_L = \frac{C_{EDTA} \times V_{EDTA} \times 56.08 \times 100}{m_{éch} \times 1000}$$

II. 2. 1. 2. La méthode routine

Peser 1 g d'échantillon et Mettre dans fiole et ajouter 40 ml d'éthylène glycol, placer la fiole en étuve pendant 1min 30 sec et 110 °C, filtrer la solution en ensemble de filtration sous vide, ajouter quelque goutte de bleu méthylène et titrer par HCl 0.1 N jusqu'à la couleur jaune Consignez la valeur V_{HCl} .

$$\% CaO_L = (V_{HCl2} - V_{HCl1}) \times T_{CaOL}$$

II. 2. 2. Détermination du pourcentage de (SO₃) (la méthode référence)

Peser 0.2g de la matière (ciment) dans un bécher 250 ml, ajouter 50 ml de l'eau distillé et 5 ml de l'acide chlorhydrique à 50% porter sur une plaque chauffante jusqu' à l'attaque complète (coloration jaune); Ajuster jusqu'à 200 ml avec l'eau distillé et laisser refroidir dans un bain-marie.

Mettre le bécher sur un agitateur magnétique et ajouter une cuiller de chlorure de baryum BaCl₂ (saturation de la solution).

Une fois tout le BaCl₂ est dissout remplir la cellule de l'appareil turbidimètre jusqu' au trait, lire la valeur affichée en NTU et faire la conversion en %SO₃ dans le tableau correspondant. [39]

II. 2. 3. Détermination de la perte au feu (PAF)

On prend et peser un creuset en platine vide et propre on met de 1 g matière(P₁), entrée le creuset en four électrique 950 °C pour mesurée la décarbonatation, après 20 min sorte la matière et attend quelque minute pour refondée et pesez le creuset (P₂).

Remarque : La même technique dans 550 °C pour calculer déshydratation.

La PAF déterminée sous forme suivante :

$$\%PAF = \frac{P_1 - P_2}{1g} \times 100$$

P₁ : Poids de creuset sous vide et 1g de la matière avant la décarbonatation.

P₂ : Poids de creuset et matière après la décarbonatation.

II. 2. 4. Analyse par fluorescence RX

La spectrométrie de Fluorescence X (SFX ou FX) ou en anglais X Ray Fluorescence (XRF) est une technique d'analyse élémentaire qui permet de :

A. Qualifier les éléments chimiques présents dans un échantillon c'est-à-dire connaître les éléments constituant l'échantillon (exemple : Calcium, Silicium, Aluminium, Fer...).

B. Quantifier les éléments présents c'est-à-dire connaître leur teneur (exemple : 70% de calcium, 8% de silicium...). [4]



Figure II.1: Analyseur XRF

II. 2. 5. Détermination l'humidité

On prend et pèse un plat vide et propre on met de 10g matière P_1 , entre le plat en sécheur $110\text{ }^\circ\text{C}$ pour mesurer la déshydratation dans les matières premières, après 8 heures sorte la matière et pesez le plat P_2 .

Remarque : gypse en $45\text{ }^\circ\text{C}$; cause les éléments sulfate évaporée et 2 heures

$$\%H_2O = \frac{P_1 - P_2}{10g} \times 100$$

P_1 : Poids de matière avec plat.

P_2 : Poids de P_1 après le séchage (sans H_2O).

II. 3. Méthodes physico-mécaniques

Les appareils dans ces essais conformes aux normes européennes 196-1

II. 3. 1. Détermination du pourcentage des refus

La détermination du pourcentage des refus de matière se fait après le broyage, les refus déterminent et contrôlent l'état de fonctionnement du broyeur et le degré du broyage.

On pèse 10 g de l'échantillon puis verse dans un tamis de $45\text{ }\mu\text{m}$ ou $90\text{ }\mu\text{m}$ pendant 2 minutes. Les particules restantes au-dessus du tamis représentent le pourcentage de refus.

[35]

Pour calculer le refus par la formule suivant :

$$Refus = \frac{m_2}{m_1} \times 100\%$$

m_1 : masse de matière

m_2 : masse de matière après le tamisée



Figure II.2 : Alpine de refus

II. 3. 2 Taux de calcaire

C'est un paramètre obtenu après calculer le refus de ciment.

II. 3. 3. Mesure de la surface spécifique par la méthode Blaine (SSB)

L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture de ciment est appelé « Perméable mètre de Blaine ». Cet appareil est schématisé sur (**Figure II.4**). Il se compose pour l'essentiel d'une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester et d'un manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur (N° 4) d'une huile légère. La cellule est équipée d'une grille en sa partie inférieure.

Un piston sert à tasser le ciment dans la cellule sous un volume V défini. [32]



Figure II.3 : Appareil de Blaine

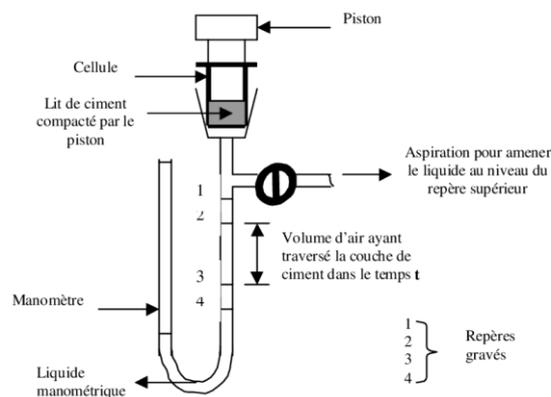


Figure II.4 : Principe de fonctionnement de Blaine

II. 3. 4. La consistance normale

C'est la détermination de la consistance normalisée de la pâte de ciment selon les spécifications de la norme européenne EN 196-3. Dans cet essai, la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet de la vibration. [33]

II. 3. 5. Détermination du temps de prise

C'est la détermination du temps de prise du ciment selon les spécifications de la norme européenne EN 196-3. [33]

II. 3. 5. 1. Détermination du temps début de prise

Le temps de début prise correspond à la lecture de 6 ± 3 mm noté à partir du temps zéro. [33]

II. 3. 5. 2. Détermination du temps fin de prise

Le temps de fin de prise correspond à la lecture de 0,5 mm noté à partir du temps zéro. [33]



Figure II.5 : Appareil Vicat

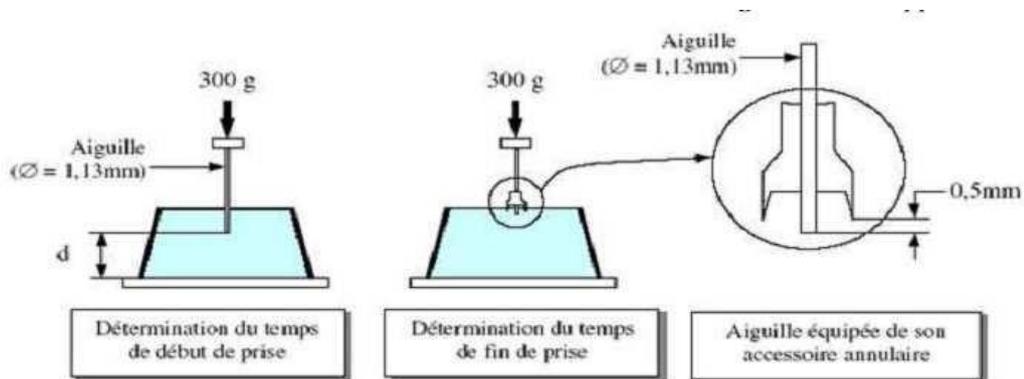


Figure II.6 : Mesure de prise

II. 3. 6. Essais d'expansion

Le ciment étudié est gâché à la consistance normale déterminée selon la norme EN196-3, puis introduit à l'intérieur de petits moules cylindrique (en métal élastique résistance la corrosion) et maintenu entre deux plaques de verre.

Ces moules fondus selon on génératrice son munis verticalement de deux aiguilles de 15 cm qui amplifient 10 fois la mesure de déformation ils sont immédiatement places en armoire ayant une humidité relative $\geq 90\%$ et une température 20 ± 1 pendant 24 ± 0.5 heures on mesure alors écartements initial.

L'essai exposures peut être effectué à froid au suivant la méthode normalisée, à chaud l'écartement final est alors mesuré après 3 heures d'ébullition. [40]

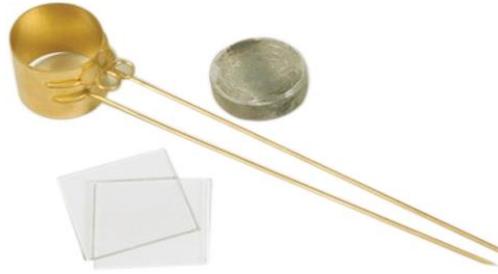


Figure II.7 : Moule d'expansion

II. 3. 7. Essais mécaniques (flexion - compression)

II. 3. 7. 1. Définition

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

Les essais de flexion et de compression permettent de déterminer la contrainte de rupture à la traction par flexion et la compression des liants hydrauliques. [4]

II. 3. 7. 2. Appareillage



Figure II.8 : Moule de 4 cm x 4cm x16cm



Figure II.9 : Malaxeur



Figure II.10 : Chambre d'humidité



Figure II.11 : Table à vibrante



Figure II.12 : Appareil de flexion et compression

II. 3. 8. Mesure La chaleur hydratation (EN196-9)

La présente Norme européenne décrit une méthode de mesure de la chaleur d'hydratation des ciments par calorimétrie semi-adiabatique, dite méthode de La gavant. L'essai a pour but démesurer en continu la chaleur d'hydratation du ciment au cours des tout premiers jours. La chaleur d'hydratation est exprimée en joules par gramme de ciment.

La méthode semi-adiabatique consiste à introduire un échantillon de mortier fraîchement préparé, dans un calorimètre afin de déterminer, d'après l'évolution de la température, la quantité de chaleur dégagée. À une échéance donnée, la chaleur d'hydratation du ciment contenu dans l'échantillon est égale à la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant pendant toute la durée de l'essai. [34]



Figure II.13 : Appareil de chaleur hydratation

Chapitre III

*Les matériaux,
les essais utilisés et
Résultat*

Ce chapitre est consacré à la caractérisation des matières premières, la méthode de formulation de ciment et description des essais utilisés.

Les analyses chimiques ont été réalisées dans le laboratoire de la cimenterie CILAS.

III. 1. Matières première

Les principaux composants de ciment élaborés sont :

- a. Clinker
- b. Gypse

III. 1. 1. Clinker

La composition chimique des oxydes bruts détermine la composition minérale du clinker, et il faut donc être prudent dans les matériaux qui entrent dans le four afin d'obtenir la meilleure composition du composé important C_3S .

Les matières premières utilisées pour former le clinker de la cimenterie de CILAS indiquées dans le tableau :

Tableau III-1 : Principaux constituants de clinker.

Clinker	Clinker de CILAS
Ingrédient du clinker	Calcaire
	Argile
	Sable
	Minerai de fer

III. 1. 1. 1. Compositions chimiques et minéralogiques du clinker

Les différents résultats de compositions chimiques et minéralogiques de tous les échantillons de clinker utilisés sont indiqués dans le tableau III.2 et tableau III.3.

Tableau III-2 : Les compositions chimiques du clinker

	SiO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl
1^{er} Ech	21.5	5.38	3.29	65.83	1.77	0.87	0.7	0.21	0.05
2^{em}Ech	21.45	5.2	3.23	65.78	1.57	0.76	0.65	0.21	0.037
3^{em}Ech	21.34	5.184	3.31	66.28	1.89	0.78	0.67	0.21	0.02

4^{em}Ech	21.05	5.27	3.26	65.86	1.51	1.11	0.67	0.21	0.036
5^{em}Ech	21.45	5.21	3.37	65.83	1.88	0.77	0.65	0.21	0.03

Tableau III-3 : Les compositions minéralogiques du clinker

Echs \ Comps	C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF	CaO_L
1^{er} Ech	42.15	29.93	8.69	10	5.31
2^{em}Ech	60.14	16.15	8.32	9.819	1.23
3^{em}Ech	55.39	19.41	8.15	10.06	3.09
4^{em}Ech	62.74	13.04	8.46	9.91	1.29
5^{em}Ech	53.48	21.18	8.11	10.24	2.85

III. 1. 1. 2. Modules caractéristiques du clinker

Ces modules sont importants pour contrôler la qualité des échantillons du clinker sont données en tableau III-4.

Tableau III-4 : Les Modules caractéristiques du clinker

Echs \ Modules	LSF	MS	MA
1^{er} Ech	95.84	2.47	1.63
2^{em}Ech	96.32	2.54	1.61
3^{em}Ech	97.43	2.51	1.56
4^{em}Ech	97.89	2.47	1.62
5^{em}Ech	96.25	2.50	1.55

1. Le facteur de saturation en chaux (M_{LFS}) compris entre 92 et 96

$$LSF = \frac{CaO\%}{(2.8 \times S\%) + (1.18 \times A\%) + (0.65 \times F\%)}$$

2. Module silicique (M_S), compris entre 2 et 3

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

3. Module aluminoferrique (M_{AF}), compris entre 1,5 et 2,5

$$MA = \frac{A\%}{F\%}$$

Exp: (1^{er} Ech)

$$LSF = \frac{65.83}{(2.8 \times 21.5) + (1.18 \times 3.8) + (0.65 \times 3.29)} \quad LSF = 95.84 \%$$

$$MS = \frac{21.5}{3.8 + 3.29} \quad MS = 2.47 \%$$

$$MA = \frac{3.8}{3.29} \quad MA = 1.63 \%$$

III. 1. 2. Le gypse

Le gypse est un composé sulfate de calcium déshydraté, calcium a été maintenu constant à 5%, dans la préparation de tous les ciments.

III. 1. 2. 1. Les compositions chimiques

Les compositions chimiques du gypse sont données en tableau III.5.

Tableau III-5 : Les compositions chimiques du gypse

Comps	SiO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	PAF	Humd
Gypse	1.49	0.37	0.18	32.59	0.41	41.72	0.03	0.01	0	21.62	1.96

❖ Les rôles principaux de gypse

- A. Contribue la résistance à 02 jours.
- B. Régulateur de prise.
- C. Aide de broyage de ciment.

III. 2. Formulation des échantillons du ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est le CEM1-CPA (Témoin) composé de clinker 95% et de gypse 5% et a été fabriqué en laboratoire.

III. 2. 1. Analyses chimiques et minéralogiques des échantillons ciments

Dans cette étude, nous avons utilisé un seul type de ciment (CEM1-CPA) et cinq échantillons différents.

Tableau III-6 : Les compositions chimiques du ciment

	SiO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl
1^{er} Ech	20.11	5.60	3.38	65.23	1.80	2.73	0.64	0.18	0.049
2^{em}Ech	21.19	5.55	3.44	65.52	1.64	2.52	0.61	0.17	0.041
3^{em}Ech	21.07	5.44	3.41	65.46	1.88	2.49	0.65	0.16	0.026
4^{em}Ech	20.59	5.61	3.44	65.63	1.57	2.57	0.62	0.19	0.033
5^{em}Ech	20.72	5.55	3.48	65.74	1.89	2.46	0.62	0.17	0.047

Tableau III-7 : Les compositions minéralogiques du ciment

	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaOL
1^{er} Ech	56.012	15.400	9.121	10.285	3.50
2^{em}Ech	59.575	15.809	8.887	10.467	0.96
3^{em}Ech	54.511	19.162	8.646	10.376	2.52
4^{em}Ech	61.982	12.274	9.046	10.467	1.5
5^{em}Ech	55.197	17.760	8.819	10.589	3.12

III. 2. 2. Module cuvalle du ciment

$$Q_v = \frac{\frac{SO_3\%}{M_{SO_3}}}{\frac{K_2O\%}{M_{K_2O}} + \frac{Na_2O\%}{M_{Na_2O}} - \frac{Cl\%}{M_{Cl}}}$$

Tableau III-8 : Le module caractéristique Q_v du ciment

Echs	1 ^{er} Ech	2 ^{em} Ech	3 ^{em} Ech	4 ^{em} Ech	5 ^{em} Ech
Q_v	3.78	3.64	3.41	3.49	3.54

III. 3. Formulation des mortiers normalisés

Le mortier est constitué par le mélange suivant :

- A. 1350g sable normalisé (Norme EN 196-1).
- B. 450 g du ciment.
- C. 225 g l'eau de gâchage.

III. 3. 1. L'eau de gâchage

L'eau utilisée pour la formation des mortiers est une eau distillée préparé dans laboratoire de la cimenterie CILAS.

III. 3. 2. Le sable normalisé

Dans notre étude expérimentale, nous avons utilisé un sable normalisé (STANDARD SAND - SABBIA NORMALE) certifié CEN, EN 196-1 conforme ISO 679 :2009 .



Figure III.1: Sable normalisé

III.4. Mesures expérimentales

III. 4. 1. Essai sur le ciment anhydre

III. 4. 1. 1. Mesure SSB de Blaine (EN 196-6)

a. Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la durée du passage d'un volume d'air à travers un lit de ciment avec une dimension et une porosité spécifiées.

La surface spécifique est proportionnelle au temps mis pour traverser la couche de ciment.

b. Conduit de l'essai

1. choisit la surface spécifique sur l'appareil puis on détermine le type de ciment et on prend la valeur de la masse.

2. Peser une quantité de ciment.

3. Mettez le papier filtre avant d'appliquer la poudre, puis pressez la poudre au maximum, mettez un autre papier filtre et fermez la cellule.

4. Mettez la cellule dans l'appareil, puis appuyez sur le bouton de démarrage et attendez quelques secondes que le résultat apparaisse.

Calculer la surface spécifique sur la forme suivante :

$$SSB = \frac{k \times \sqrt{t} \times \sqrt{e^3}}{\rho \times (1 - e) \times \sqrt{0.1\eta}} \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right)$$

Avec :

k : constante de l'appareil (K= 2.106)

ρ : La masse volumique du ciment en g/cm³

η : Viscosité de l'air à la température de l'essai en poise

t : Temps de passage de l'air dans la couche de la poudre de ciment en seconde.

m : Est la masse à introduire dans la cellule de l'appareil Blaine $m = \rho \times v \times e$

v : La volume de cellule $v = 1.848 \text{ cm}^3$

e : porosité du ciment dans la cellule $e = 0.5 \text{ cm}$



Figure III.2: Blaine mètre

Tableau III-9: SSB de différent échantillons

Echs	1 ^{er} Ech	2 ^{em} Ech	3 ^{em} Ech	4 ^{em} Ech	5 ^{em} Ech
SSB (cm ² /g)	4200	4226	4173	4102	4466

III. 4. 1 .2. Détermination du refus pour le ciment

Le tamis Alpine fonctionne par courant d'air et sans aucun mouvement mécanique.



Figure III.3: Tamiseuse Alpine

Pour le ciment est déterminé sur des tamis de 45 μ m et 90 μ m.

Donc réellement les étapes suivre :

1. Placer le tamis sur l'Alpine
2. Peser $m_1 = 10g$ de matière bien homogène et videz sur le tamis
3. Mettre le couvert et pressez sur le bouton de démarrage
4. Tamiser sur pendent 2 minutes a 2000 P
5. Peser m_2 et calculer le refus comme suit :

$$Refus = \frac{m_2}{m_1} \times 100\%$$

Tableau III-10: Caractéristiques de refus 45 μ m, 90 μ m et taux de calcaire

Echs	1 ^{er} Ech	2 ^{em} Ech	3 ^{em} Ech	4 ^{em} Ech	5 ^{em} Ech
45 μ m	16.18	9.83	12.98	9.17	10.13
90 μ m	1.16	1.08	1.19	0.65	0.75
TauxCal%	10.85	9.71	4.91	7.05	10.93

III. 4. 2. Essais sur mortier

III. 4. 2. 1. Mortier normalisé

Afin de confirmer l'évolution de la résistance mécanique, des éprouvettes contenant un mélange de ciment Portland ont été coulées selon les normes EN 196-3 et EN 196-1

III. 4. 2. 2. Préparation des éprouvettes pour les essais mécaniques

Les essais mécaniques ont été préparés des éprouvettes prismatiques de dimensions (4x4x16) cm³ selon la norme EN 196-1 dans un malaxeur semi-automatique. (Voir la Figure III.4 et Figure III.5).



Figure III.4: Eprouvette (4x4x16) cm³ **Figure III.5:** Malaxeur semi- automatique

Dans les méthodes de test du ciment, nous utilisons une table vibrante pour le comprimer mécaniquement et éliminer les bulles d'eau (Figure III.6).



Figure III.6: Table vibrante

Les moules est placé en chambre d'humidité de 20 ±2 °C et une humidité 90% pendant 24 heures (Figure III.7).

Les éprouvettes prismatiques sont immergées en des bains d'eau avec régulation de température 20 °C ± 2 °C.



Figure III.7: Chambre d'humidité

Avant de commencer l'essai, nous exposons les éprouvettes à l'air pour gagner de l'humidité environnante.

a. Les essais sont d'abord effectués en flexion sur une presse permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10KN asservie en chargement de $50\text{N/s} \pm 10\text{N/s}$.

b. Les essais de compression sont effectués par une presse de type Perrier d'une charge de 200KN asservie en chargement de $2400\text{N/s} \pm 200\text{N/s}$ (Figure III.8).



Figure III.8: la presse de flexion et compression

Les résultats de l'essai de flexion et compression de tous les échantillons est organes dans tableau suivant :

Tableau III-11: Résultats de flexion et compression

Resistance Echs	Flexion (MPa)		Compression (MPa)	
	2jours	28jours	2jours	28jours
1^{er}Ech	4.10	6.10	20.00	38.20
2^{em}Ech	5.50	7.60	27.20	50.20
3^{em}Ech	4.70	7.40	24.10	46.80
4^{em}Ech	5.50	7.70	26.80	50.10
5^{em}Ech	4.90	7.00	23.90	45.90

Chapitre IV
Interprétations et
Discussion

Ce chapitre vise à décrire, commenter et interpréter les résultats des essais relatifs à des tests de flexion et de compression sur de mortier de ciment.

Pour étudier les facteurs affectant les propriétés mécaniques des mortiers de ciment, 10 éprouvettes prismatiques (16x4x4) cm³ ont été réalisés après 2 jours et 28 jours de conservations dans l'eau.

IV. 1. Effet de C₃S sur la résistance compression

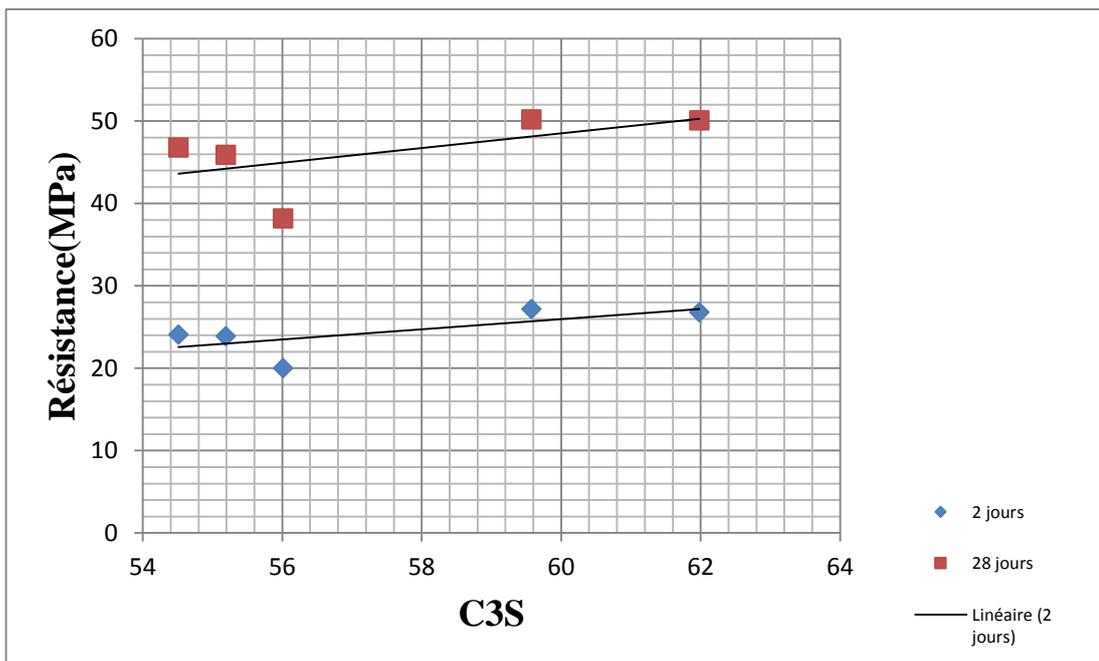


Figure IV.1 : La variation de résistance de compression en fonction de C₃S

Les courbes représentées sur la Figure. IV.1, montrent que la résistance augmente avec l'augmentation de l'élément C₃S pour les essais de 2 jours et 28 jours, indiquant qu'une augmentation du composant C₃S dans le ciment conduit à une amélioration de la résistance.

IV. 2. Effet de refus sur la résistance compression

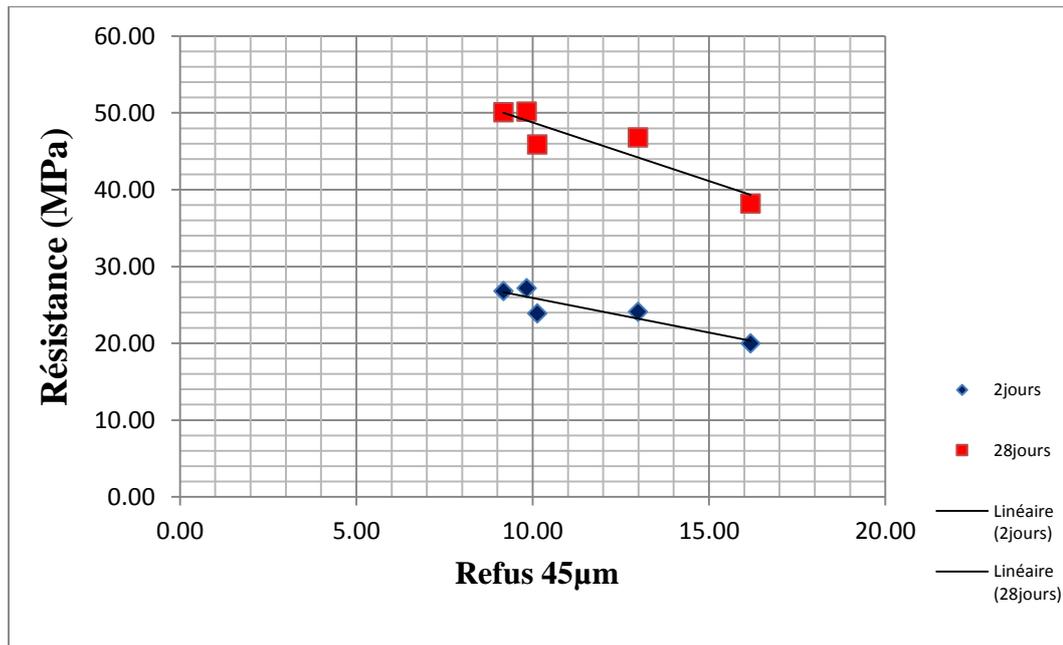


Figure IV.2: La résistance compression en fonction refus 45µm

Les résultats obtenues et représentés sur la Figure IV.2, ont montré la diminution de la résistance avec l'augmentation de refus 45 µm pour les essais de 2 jours et 28 jours.

IV. 3. Effet de Taux de calcaire sur la résistance compression

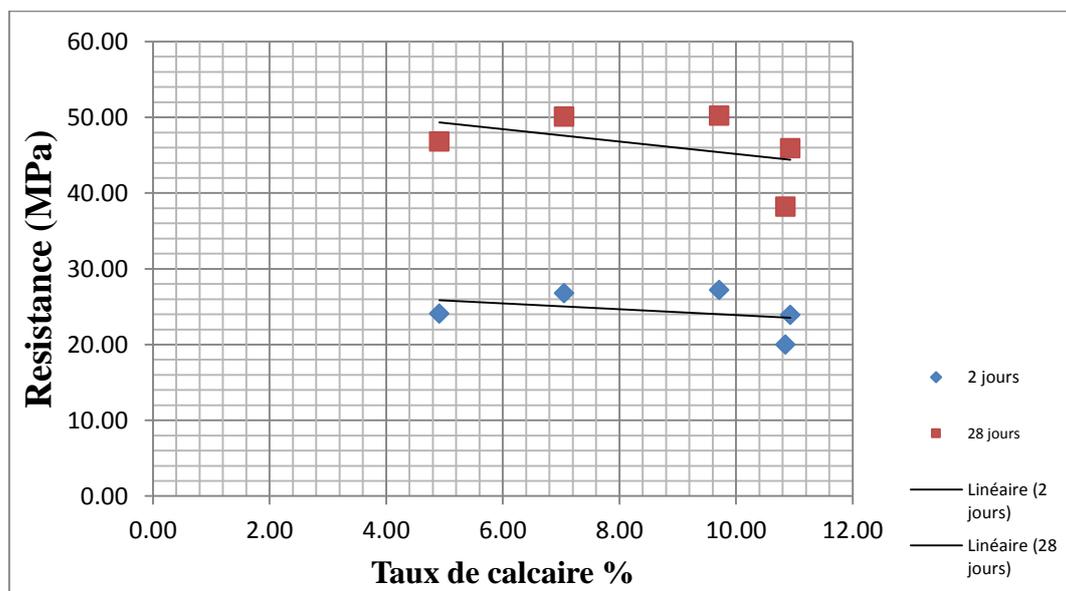


Figure IV.3: La résistance compression en fonction taux de calcaire

Sur la Figure IV.3, nous représentons les résultats obtenues lors de l'étude de l'effet de taux de calcaire sur la résistance de compression.

Nous remarquons sur cette figure, lorsque le taux de calcaire augmente, la résistance diminue pour les essais de 2 jours et 28.

IV. 4. Effet des éléments chimiques mineur sur la résistance compression

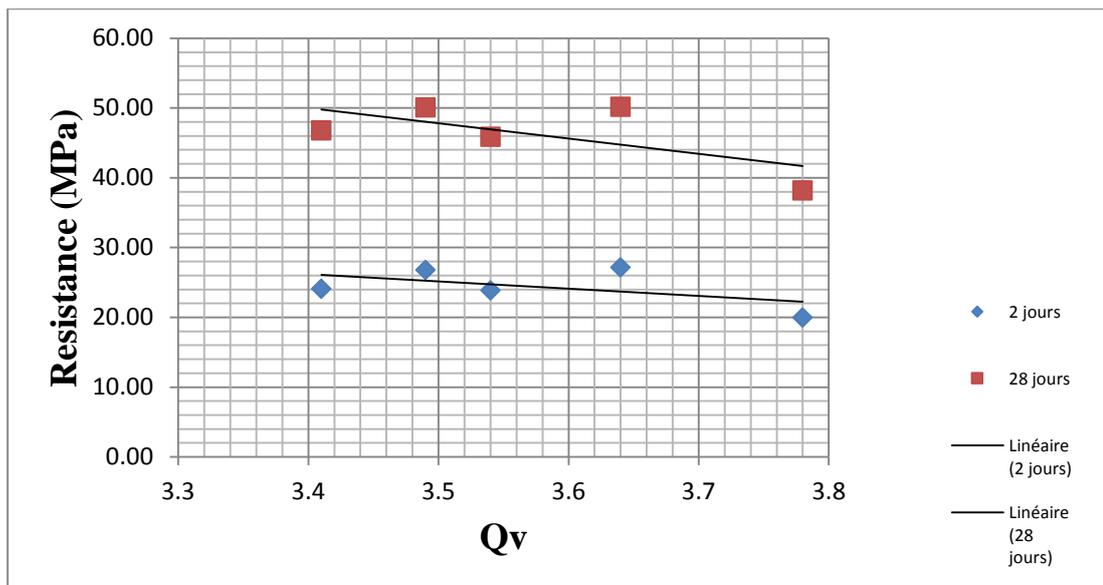


Figure IV.4: La résistance compression en fonction de cuvalle Q_v

La Figure IV.4, indique une inverse relation entre le module de cuvalle et la résistance pour les essais de 2 jours et 28 jours; c. à .d la résistance diminue avec l'augmentation des valeurs de cuvalle.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Ce travail, qui avait pour but l'étude et connaître les éléments affectant la réaction du clinker et ses résultats sur le ciment, dans lequel des essais et analyses ont été réalisés sur cinq échantillons du ciment d'un seul type CEM1 (CPA).

Les résultats obtenus nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

1. Le C3S est le principal composant sortie de la réaction du clinker et est un composant important pour donner la résistance idéale au ciment.

2. L'effet du refus et le taux du calcaire est sur la résistance mécanique inversement, de sorte que ces deux facteurs doivent être préservés dans un domaine spécifique pour donner au ciment une bonne réaction avec l'eau et une excellente résistance.

3. C'est un indicateur important de l'état du clinker et il indique également le pourcentage de présence les éléments mineur dans le clinker, de sorte que chaque augmentation des éléments mineur entraîne des résultats qui ont un pré-effet qui réduit la réaction du clinker dans la formation des éléments majeur et un effet dimensionnel ainsi que dans l'interaction du ciment avec l'eau et la diminution de la résistance mécanique.

Le résultat est qu'il existe des éléments qui affectent la réactivité du clinker, et à partir de celui-ci, les normes industrielles (les normes européennes EN 196-1) doivent être suivies afin d'obtenir des bonnes réactions et produire un ciment avec une excellente résistance.

Références

Références

- [1] **ADELLI Kamal**, « *Influence des laitiers sur la microstructure des bretons a l'état frais et durci* », Thèse de Magister, Université SCIENCE TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE, Algérie, 2010.
- [2] **ZENNOUCHE Abdenour, BENMAHFOUD Chouaib**, « *Compatibilité ciment au laitier-super plastifiants. Application à l'étude du comportement rhéologique et physico-mécanique des BAP* », Mémoire de Master, Université M'HAMED BOUGARA, Algérie, 2016.
- [3] **BENAISSA Abouseyf, HASSINOUI Yousouf**, « *Optimisation du Taux Des Incuits Dans le Ciment CEM II/A 42,5*», Mémoire de Master, Centre Universitaire BELHADJ BOUCHAIB D'AÏN, Algérie, 2018.
- [4] **MEBARKI Henen**, « *Etude comparative des clinkers de l'ouest Algérien : Analyse Physico-chimique et Applications* », Mémoire de Master, Université TLEMCEM, Algérie, 2013.
- [5] **GHERMAOUI Amina**, « *Effets de certains métaux sur les propriétés physico-chimiques des mortiers de ciment de Béni-Saf sans ou avec ajout de pouzzolane*», Mémoire de Master, Université TLEMCEM, Algérie, 2015.
- [6] **BEN AZIZA Zouhir, AICH Naim**, « *Augmentation de la production du ciment de Hamma Bouziane par élaboration d'un nouveau schéma de préparation mécanique* », Mémoire de Master, Université LARBI TEBESSI, Algérie, 2017.
- [7] **DAHMANI Salah**, « *Effet de l'association laitier-calcaire sur les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques de ciments* », Mémoire de Master, Université MOHAMED BOUDIAF, Algérie, 2016.
- [8] **HUSSON Sophie**, « *Étude physicochimique et mécanique des interactions ciment-fillers. Application aux mortiers* », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines, France, 1991.
- [9] **BENKHERREDINE kherredine, DELOUM Abderahim**, « *Confection et Activation chimique d'un ciment Prépare à base de laitier* », Mémoire de Master, Université MOHAMED BOUDIAF, Algérie, 2019.

- [10] **AZZOUZ Walid Tewfik, REZIG Mokhtaria**, « *Valorisation des poussières de farine crue issues de l'industrie ciment dans la traitement des eaux urbaines* », Mémoire de Licence, Université MOULAY TAHAR, Algérie, 2014.
- [11] **SAILAA Rabah**, « *L'influence de la chaux libre du clinker sur les Propriétés physico-chimiques et mécaniques du ciment portland* », Mémoire de Master, Université MOHAMED BOUDIAF, Algérie, 2016.
- [12] **F. DIADHIOU Henri**, « *Le dépoussiérage et la filtration aux Ciments Du Sahel :Etude du fonctionnement et de la maintenance du Baghouse*», Thèse Ingénieur, Université CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR, Sénégal, 2008.
- [13] **BENCHEIKH Amel**, « *Contribution à la caractérisation d'un ciment à base du laitier +5 % de calcaire*», Mémoire de Master, Université MOHAMED BOUDIAF, Algérie, 2016.
- [14] **YAHIA Mohamed**, « *Contribution à la valorisation d'un déchet de cimenterie(ciment hydraté) pour l'élaboration d'un nouveau ciment* », Mémoire de Master, Université MOHAMED BOUDIAF, Algérie, 2016.
- [15] **BERREHAIL Walid**, « *Automatisation et supervision d'un système déchargement du ciment en vrac à l'aide d'un automate programmable S7-300 et logiciel WinCC*», Mémoire de Master, Université MOHAMED KHIDER, Algérie, 2017
- [16] **DREUX Georges, FESTA Jean**,« *Nouveau guide du béton et de ses constituants* », 8^{ème} édition, Eyrolles, 1998.
- [17] **BENGUEDOUAR Afeff**,« *Synthèse et caractérisation de silicates de calcium hydrates (C.S.H) hybrides* », Thèse de Magister, Université CONSTANTINE I, Algérie, 2013.
- [18] **SABRI Safia**, «*Elaboration et détermination des propriétés d'un nouveau ciment composé à base de pouzzolanes artificielles*», Thèse de Magister, Université SCIENCE TECHNOLOGIE D'ORAN, Algérie, 2010.
- [19] **AMOURI Chahinez**, «*Contribution à l'étude de l'influence des différents ajoutssur les propriétés des matrices cimentaires(Caractérisation, Performances, Durabilité)* », Thèse de Doctorat, Université MENTOURI, Algérie, 2009.
- [20] Documents de CILAS, « *Clinker optimization guideline* », Version 1.1, 2017.
- [21] **BENLARBI Arbi Seghir, LADJEL Zakaria**, « *Essais de préparation des crus et clinkers par simulation à l'aide de l'ordinateur en utilisant le logiciel de gestion de la*

qualité du ciment dans le système carrière-usine », Thèse de Magister, Université ABDERRAHMAN MIRA, Algérie, 2017.

[22] **KADRI Mohammed Rafiq, ROUIGUEB Soumia ,CHIKH Hadjer Abir,** « *Contribution à la réduction des émissions de CO₂ et de la consommation énergétique dans l'industrie cimentaire par l'amélioration d'un système de production : Cas de la cimenterie de Béni-Saf* » Mémoire de Master, Université TLEMCEM, Algérie, 2017.

[23] **BOUALI Khaled,** « *Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires* », Thèse de Magister, Université M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, Algérie, 2014.

[24] **Chetti Walid,** « *Automatisation de Système de traitement de l'Eau Usée (CILAS)* », Mémoire de Master, Université MOHAMED KHIDER, Algérie, 2019.

[25] **Wieslaw Kurdowski,** « *Cement and Concrete Chemistry* », Springer Science, Poland, 2014.

[26] **BOURAOUI Slaheddine,** « *Effet des sulfates alcalines sur les propriétés des ciments avec et sans superplastifiant* », Université SHERBROOKE, Canada, 1997.

[27] **EDWIGE Nicolas,** « *Compatibilités et incompatibilités liants cimentaires / superplastifiants* », Thèse de Doctorat, Université du LUXEMBOURG, Luxembourg, 2010.

[28] **ADJTOUTAH Lamia, BOUZIDI Ferial,** « *Utilisation de metakaolin dans le ciment* », Mémoire de Master, Université ABDERRAHMAN MIRA, Algérie, 2018.

[29] **KHOUADJIA Mohamed Lyes Kamel,** « *Etude des propriétés physico-mécanique et rhéologiques des bétons à base des sables de carrières : expérimentation et modélisation* », Thèse de Doctorat, Université MOHAMED KHIDER, Algérie, 2016.

[30] **BELGHITI Ali, GUENDOZ Aimene,** « *Préparation théorique du cru et clinker à ciment par le logiciel de gestion de la qualité. Application à la Cimenterie de Sidi Moussa-ADRAR* », Mémoire de Master, Université ABDERRAHMAN MIRA, Algérie, 2018.

[31] Document de référence sur les meilleures techniques disponibles, « *Industries du ciment, de la chaux et de la magnésie* », 2010.

[32] **BITAR Zeyneb,** « *Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux (calcaire) sur le comportement mécanique du mortier* », Mémoire de Master, Université MOHAMED BOUDIAF, Algérie, 2016.

- [33] **DELALDJA Dalila**, « *Valorisation des déchets industriels dans la formulation des mortiers soumis à des températures élevées* », Mémoire de Master, Université MOHAMED BOUDIAF, Algérie, 2018.
- [34] **AOUIDIDI Lwiza**, « *Caractérisation d'un ciment à base de pouzzolane* », Mémoire de Master, Université MOHAMED BOUDIAF, Algérie, 2016.
- [35] **MOURAH Mohamed El Amine**, « *L'effet de pouzzolane sur les comportements mécaniques de mortier* », Mémoire de Licence, Université AKLI MOHAND OULHADJ, Algérie, 2018.
- [36] **BOUALLA Nabil**, « *Etude de l'influence de l'ajout de la pouzzolane sur les caractéristiques physico- chimiques des ciments* », Mémoire de Licence, Université SCIENCE TECHNOLOGIE D'ORAN, Algérie, 2011.
- [37] **FAURE Antoine**, « *Capacité d'un sédiment à se substituer à la fraction argileuse de la matière première de l'industrie des liants hydrauliques* », Thèse de Doctorat, Université de LIMOGES, France, 2017.
- [38] **DAHAMNI Mohamed, SARRI Arezki**, « *Etude des matières premières et du produit fini du ciment de l'usine de Sour el ghezlane* », Mémoire de Master, Université Mohamed AKLI OULHADJ, Algérie, 2015.
- [39] Document de laboratoire chimique de CILAS.
- [40] Document de laboratoire physique de CILAS.