

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**UNIVERSITÉ de BLIDA 1**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie des Procédés**



# Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER EN GENIE DES PROCEDES**

**Spécialité : Génie des procédés des matériaux**

**L'impact de calcaire sur les propriétés chimiques et physico-mécaniques dans la classe A du ciment**

Présenté par :

ZADMI Hanane

ADJIRI Kaouther

Encadré par :

Mr : TOUMI Farid

Co-Eencadré par :

Docteur : BENSAPHLA Naziha

Année universitaire 2022/2023

## Remerciements

En premier lieu nous remercions ALLAH le tout puissant de nos avoir accordé le courage et la force de déterminer à bien ce mémoire.

Nous tenons à exprimer nos profondes gratitudee à notre promotrice Mme BENSAPHLA pour l'encadrement de ce mémoire.

Nous tenons à remercier très chaleureusement monsieur TOUMI Farid responsable du laboratoire de contrôle de qualité de la cimenterie de Meftah pour nous avoir donné les ressources matérielles ainsi que son temps et son assistance.

Nous partageons nos remerciements à tous les membres du laboratoire de contrôle, ingénieurs et Des techniciens avec qui ce fut un plaisir de travailler.

Nous tenons à remercier notre professeur ZERMANE Faiza pour nous avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être membre du jury et juge sur ce travail.

Nous tenons à remercier tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Enfin, nous remercions tous ceux qu'ont contribués de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

## **Dédicace**

### **Je dédie cette mémoire**

#### **A ma très chère mère**

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur

#### **A mon très cher Père**

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

A ma chère sœur **Amal** et mes frères **Abd Elmalek, Younes** et **Oussama**

A tout ma famille paternelle **ZADMI** et maternelle **DJENNI**

A tous mes professeurs, en particulier professeur madame **Z. CHEMAT**

Aux étudiants du master G.P.M promo 2023

A ma chère binôme **ADJIRI Kaouther**

A tous ceux qui me sont chers

Et à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation

**ZADMI Hanane**

## **Dédicace**

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents pour leur amour, soutien, patience, encouragement tout au long de ma  
vie et mes études.

A mes chers sœurs, frères et toute ma famille, source d'espoir et de motivation

A tous mes amis, mes collègues qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de  
succès.

A ma chère binôme ZADMI Hanane

A toutes personnes que j'aime et qui m'aiment à ceux qui me donnent de l'amour et de ma  
vivacité

**A moi-même surtout**

**ADJIRI Kaouther**

## ملخص:

نهتم في هذه الدراسة بتقييم مزايا وإمكانيات إضافة الحجر الجيري ليحل محل الأسمنت جزئياً وتأثيره على نشاط الملاط.

أتاحت الدراسة التجريبية تحضير الأسمنت الممعدن عن طريق استبدال نسبة معينة من الكلنكر بإضافة الحجر الجيري بنسب مختلفة (0%، 5%، 10%، 15%، 20%). وبالتالي دراسة تأثيرها على الخواص الكيميائية والفيزيائية (CEM II / A-L 42.5 N) الميكانيكية للأسمنت.

**الكلمات المفتاحية:** إضافات أسمنتية، الكلنكر، الخواص الكيميائية، الحجر الجيري CEM II / A-L 42.5 N

## Abstract:

In this study we are interested in evaluating the advantages and possibilities of adding limestone to partially replace the cement and its effect on the activity of the mortar.

The experimental study made it possible to prepare a mineralized cement by replacing a certain proportion of clinker by adding limestone at different percentages (0%, 5%, 10%, 15%, 20%). Thus study their influence on the chemical and physico-mechanical properties of cement (CEM II /A-L 42.5 N).

**Keywords:** CEM II /A-L 42.5 N, cementitious additives, clinker, chemical properties, limestone.

## Résumé :

Dans cette étude on s'intéresse à évaluer les avantages et les possibilités de l'ajout du calcaire pour remplacer partiellement le ciment et son effet sur l'activité du mortier.

L'étude expérimentale a permis de préparer un ciment minéralisé en remplaçant une certaine proportion de clinker par l'ajout du calcaire à différents pourcentages (0%, 5%, 10%, 15%, 20%). Ainsi étudier leur influence sur les propriétés chimiques et physico-mécaniques du ciment (CEM II /A-L 42,5 N).

**Mots clés :** CEM II /A-L 42,5 N, additifs cimentaires, clinker, propriétés chimiques, calcaire.

## Table des matières

Résumé

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Abréviations

Introduction générale ..... 1

### Chapitre 1 : Généralités sur le ciment

1.1	Historique .....	2
1.2	Présentation de l'entreprise .....	3
1.2.1	Date de mise en service .....	3
1.2.2	Missions et objectifs.....	4
1.2.3	Sous-direction production .....	4
1.3	Définition du ciment .....	5
1.4	Constituants du ciment .....	5
1.4.1	Farine crue .....	5
1.4.2	Clinker .....	6
1.4.3	Gypse .....	7
1.5	Matière première du clinker .....	7
1.5.1	Calcaire.....	8
1.5.2	Argile .....	9
1.5.3	Sable .....	9
1.5.4	Minerai de fer .....	10
1.6	Composants principaux du clinker.....	11
1.6.1	Silice .....	11
1.6.2	Alumine .....	11

1.6.3	Oxyde de fer .....	12
1.6.4	Chaux .....	12
1.7	Composant secondaire du clinker .....	13
1.7.1	Oxyde de magnésium MgO .....	13
1.7.2	Alcalins K <sub>2</sub> O et Na <sub>2</sub> O.....	13
1.7.3	Sulfates SO <sub>3</sub> .....	13
1.7.4	Chlorure Cl.....	14
1.7.5	Phosphores P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .....	14
1.8	Procédés de fabrication de ciment.....	14
1.8.1	Extraction de la matière – carrière .....	15
1.8.2	Concassage .....	15
1.8.3	Préparation du cru.....	16
1.8.4	Pré homogénéisation .....	17
1.8.5	Broyage et séchage .....	17
1.8.6	Séparation .....	18
1.8.7	Homogénéisation .....	19
1.8.8	Préchauffeur .....	19
1.8.9	Four rotatif .....	20
1.8.10	Refroidissement.....	21
1.8.11	Stockage de clinker.....	21
1.8.12	Broyage de clinker.....	22
1.8.13	Stockage, Ensachage et Expédition.....	22
1.9	Ajouts cimentaires .....	23
1.9.1	Laitiers de haut fourneau .....	23
1.9.2	Cendres volantes .....	24
1.9.3	Filles calcaires .....	24
1.9.4	Fumés de silice .....	24
1.9.5	Pouzzolanes .....	25
1.10	Intérêt de l'utilisation des ajouts.....	25

1.10.1 Bénéfices fonctionnels .....	25
1.10.2 Bénéfices économiques .....	25
1.10.3 Bénéfices écologiques et environnementaux.....	25

## **Chapitre 2 : Matériels et méthodes**

<b>2.1</b> Introduction .....	26
<b>2.2</b> Matériaux utilisés .....	26
2.2.1 Préparation des échantillons .....	26
<b>2.3</b> Caractérisation des échantillons de ciment préparés .....	28
2.3.1 Analyses chimiques .....	28
A. Détermination de la chaux libre .....	28
B. Détermination de la perte au feu .....	29
C. Analyse spectrométrie de fluorescence X (XRF) .....	31
2.3.2 Analyses physico-mécaniques .....	32
A. Détermination de refus .....	32
B. Détermination de la surface spécifique par la méthode Blaine .....	33
C. Détermination de la résistance (par compression).....	34
D. Détermination de temps de prise .....	37

## **Chapitre 3 : Résultats et discussion**

<b>3</b> Les résultats des caractéristiques chimiques des échantillons .....	39
3.1 Résultats de l'influence du taux d'ajout sur la chaux libre CaO .....	39
3.2 Résultats de l'influence du taux d'ajout sur la perte au feu .....	40
3.3 Résultats d'analyse de fluorescence X (XRF) .....	41
<b>4</b> Résultats des caractéristiques physiques et mécaniques .....	42
4.1. Résultats de l'influence d'ajout sur le refus .....	42
4.2. Résultats de l'influence de taux d'ajout sur la surface spécifique .....	43
4.3. Résultats de l'influence de taux d'ajout sur la résistance .....	44
4.4. Résultats de l'influence de SO <sub>3</sub> sur le temps de prise .....	46
Conclusion générale .....	47
Références bibliographiques .....	48
Annex .....	52

## **Liste des tableaux :**

### **Chapitre 1 : Généralités sur le ciment**

Tableau 1-1 : la composition chimique de clinker .....	6
Tableau 1-2 : la composition chimique de gypse .....	7
Tableau 1-3 : la composition chimique de calcaire .....	8
Tableau 1-4 : la composition chimique de l'argile .....	9
Tableau 1-5 : la composition chimique de sable .....	10
Tableau 1-6 : la composition chimique de minerai de fer .....	11

### **Chapitre 2 : Matériels et méthodes**

Tableau 2-1 : la composition de ciment analysée .....	27
---	----

### **Chapitre 3 : Résultats et discussion**

Tableau 3-1 : Influence du taux d'ajout sur la chaux libre CaO .....	39
Tableau 3-2 : Composition chimique des échantillons analysée par XRF .....	41

## Liste des figures :

### Chapitre 1 : Généralités sur le ciment

Figure 1-1 : La société des ciments Mitidja SCMI .....	3
Figure 1-2 : Clinker .....	6
Figure 1-3 : Roche de gypse .....	7
Figure 1-4 : Roche de calcaire .....	8
Figure 1-5 : Argile .....	9
Figure 1-6 : Minerai de fer .....	10
Figure 1-7 : Carrière de calcaire et l'argile.....	15
Figure 1-8 : Etapes de préparation du cru .....	16
Figure 1-9 : Atelier broyage ciment .....	18
Figure 1-10 : Zone de cuisson .....	21
Figure 1-11 : Silos de stockage .....	22

### Chapitre 2 : Matériels et méthodes

Figure 2-1 : Broyeur à disque .....	27
Figure 2-2 : Ethylène Glycol.....	29
Figure 2-3 : Filtration de la solution sous vide .....	29
Figure 2-4 : Creusets en platine .....	30
Figure 2-5 : Four à moufle.....	30
Figure 2-6 : Pastille .....	31
Figure 2-7 : Appareil de Fluorescence X.....	31
Figure 2-8 : Tamis 45µm.....	32
Figure 2-9 : Tamiseuse Alpine.....	32
Figure 2-10 : Perméabilimètre BLAINE .....	33
Figure 2-11 : Préparation du mortier .....	35
Figure 2-12 : Moulage des éprouvettes .....	35
Figure 2-13 : Conservateur .....	36
Figure 2-14 : Presse de compression .....	36
Figure 2-15 : Appareil de VICAT .....	38

### **Chapitre 3 : Résultats et discussion**

Figure 3-1 : Variation de la CaO libre en fonction du pourcentage d'ajout .....	39
Figure 3-2 : Variation de la perte au feu en fonction du pourcentage d'ajout .....	40
Figure 4-1 : Variation du pourcentage de refus en fonction du pourcentage d'ajout.....	42
Figure 4-2 : Variation de la surface spécifique en fonction du pourcentage d'ajout .....	43
Figure 4-3 : Variation de la résistance de 2 jours en fonction du pourcentage d'ajout.....	44
Figure 4-4 : Variation de la résistance de 28 jours en fonction du pourcentage d'ajout .....	45
Figure 4-5 : Variation de débit de prise en fonction de SO <sub>3</sub> .....	46

## Liste des abréviations

<b>GICA :</b>	Groupe industriel des ciments d'Algérie
<b>SCMI :</b>	Société des ciments de la Mitidja
<b>C2S :</b>	Silicate bicalcique
<b>C3S :</b>	Silicate tricalcique
<b>C3A :</b>	Aluminate tricalcique
<b>C4AF :</b>	Alumino-ferrite tétracalcique
<b>CaO :</b>	Chaux libre
<b>CaCO<sub>3</sub> :</b>	Carbonate de calcium (calcaire)
<b>SFX :</b>	Spectrométrie de fluorescence X (XRF en anglais)
<b>HCl :</b>	Acide chlorhydrique
<b>PF :</b>	Perte au feu
<b>CPA CEM I :</b>	Ciment sans ajout
<b>CPJ CEM II :</b>	Ciment avec ajout
<b>SSB :</b>	Surface spécifique Blaine
<b>µm :</b>	Micro mètre
<b>NA</b>	Norme Algérien
<b>EN</b>	Norme Européenne
<b>C.S.A. F</b>	Chaux. Silice. Alumine. Oxyde de fer

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Le ciment est une partie importante des matériaux cimentaires tel que le béton mortier. Il assure une fonction mécanique car il intègre la charpente granulaire, mais il est aussi largement responsable du comportement à long terme du matériau cimentaire.

Les additifs minéraux sont largement utilisés avec le Clinker pour avoir Le ciment Portland. Ils proviennent de sources naturelles (cendres volcaniques, calcaire, tuf, etc.) ou des sous-produits industriels (fumée de silice, cendres volantes, laitier de haut fourneau, etc.). Leur valorisation présente plusieurs avantages : économique Écologie et environnement.

Les matériaux cimentaires complémentaires sont l'un des derniers développements dans la production de ciment aujourd'hui. Leur utilisation améliore les propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux cimentaires (mortier et béton). Après avoir réduit la consommation d'énergie dans la production de clinker, le remplacement du ciment Portland par des additifs peut permettre d'obtenir certains avantages économiques, et peut également protéger l'environnement en limitant les émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>). [1]

Le ciment calcaire est célèbre dans le monde entier. Son utilisation présente l'avantage de réduire l'énergie sur le plan économique et de réduire les émissions de dioxyde de carbone sur le plan environnemental.

Le but de ce travail est d'étudier au laboratoire l'influence de l'ajout (calcaire) avec différents pourcentages de (0%, 5%, 10%, 15%, 20%) sur les propriétés chimiques et physico-mécaniques du ciment (CEM II A-L 42,5 N)

Le manuscrit est subdivisé en trois chapitres, le premier chapitre est constitué une généralité sur le ciment (composition, leur fabrication, les différents ajouts cimentaires), le deuxième chapitre mentionnera les analyses chimiques et physico-mécanique de ciment sans et avec ajout, dans le dernier chapitre on présentera les résultats et discussion des essais expérimentaux.

**Chapitre 1 :**  
Généralités sur le  
ciment

## 1.1 Historique

Les Romains et les Grecs savaient déjà fabriquer du liant hydraulique en faisant réagir la chaux éteinte et des cendres volcaniques. La recherche sur l'hydraulicité des chaux a commencé à la fin du 18e siècle, pour aboutir vers 1840 à la fabrication des ciments modernes. En 1796, James Parker découvre sur l'Île de Shepp Ey (Grande Bretagne) le ciment prompt (chaux éminemment hydraulique ou ciment naturel à prise rapide, cuit à 900°C comme les chaux naturelles ordinaires), qu'il baptise le ciment romain. Ce ciment a connu de 1820 à 1920 une grande réputation. Il est fabriqué dans toute l'Europe et sert à faire des moulages au gabarit et à fabriquer des pierres factices de ciment moulé. Au début du 19e siècle, toute l'Europe s'active, la France surtout, pour ne rien devoir aux Britanniques ni à la pouzzolane italienne. Le Français Louis Vicat découvre en 1817 le principe d'hydraulicité des chaux -concernant la proportion d'argile et la température de cuisson- et publie ses travaux sans prendre de brevet. En 1824, le Britannique Joseph Aspdin dépose un brevet pour la fabrication d'une chaux hydraulique à prise rapide qu'il appelle le ciment Portland. En 1840, Louis Vicat découvre les principes d'hydraulicité des ciments Portland, par une cuisson à une température de 1450°C qui permet d'obtenir le clinker.[2]

## 1.2 Présentation de l'entreprise

La SCMI est une entreprise algérienne filiale du groupe GICA, spécialisée dans la fabrication de ciment. Le réseau national de la SCMI lui permet de fournir ses produits sur tout le territoire. Son procédé de fabrication spécifique procure à son ciment une excellente qualité respectant les normes internationales de fiabilité et de respect de l'environnement. La culture de SCMI repose sur les valeurs fondamentales de respect, de confiance, de responsabilité et d'autonomie. Dans la fabrication du ciment il existe deux voies de production, la voie humide et la voie sèche. Dans la cimenterie de Meftah seule la voie sèche est utilisée.

La Cimenterie de Meftah est localisée à proximité de la route nationale n°29, Reliant la commune de Meftah à celle de Khemis-EL-Khechna. Elle est implantée dans la commune de Meftah, Daira de Meftah, Wilaya de Blida. Elle est située à 27km au sud-est d'Alger. Elle est à une dizaine de kilomètres de la gare d'Oued Smar et à une quinzaine de kilomètres de l'aéroport international d'Alger.



Fig. 1-1 : La Société des ciments de la Mitidja (S.C.MI.)

### 1.2.1 Date de mise en service

- 31 Janvier 1975 : démarrage du cru
- 06 Mai 1975 : allumage du four
- 01 Septembre 1975 : production de ciment
- 06 Novembre 1975 : Commercialisation du ciment.[3]

### **1.2.2 Missions et objectifs**

L'unité cimenterie de Meftah a un caractère productif et commercial, la qualité de son produit ciment Portland et son organisation lui ont permis de gagner la confiance de ces clients et réaliser des performances malgré une situation conjoncturelle néfaste.

La capacité de production est située entre 0,8 et 1,2 millions de tonnes/an.

Ses missions sont :

- Gérer et maintenir les moyens de production.
- Gérer les ressources humaines.
- Informer et communiquer les informations comptables et les rapports périodiques d'activités à la direction. [4]

### **1.2.3 Sous-direction production**

Cette dernière se divise en cinq services qui sont :

- Service Fabrication
- Service Contrôle Qualité
- Service Matière Première
- Service Bureau Méthode de Production
- Service expédition. [5]

### 1.3 Définition du ciment

Le ciment est un liant hydraulique constitué de poudres minérales, d'aspect gris, obtenu par broyage et cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile à 1450°C. Le produit cuit est appelé clinker et se compose de chaux, de silice, d'alumine et d'oxyde de fer. Le ciment est fabriqué en broyant du clinker et en ajoutant du sulfate de calcium, généralement sous forme de gypse. Il forme une pâte plastique avec l'eau, qui prend et durcit progressivement même en l'absence d'air, surtout sous l'eau.

Les composants anhydres sous forme de cristaux polygonaux assez réguliers et uniformes se combinent avec l'eau et se décomposent. En s'hydratant, ils recristallisent et prennent des formes très variées : aiguilles, bâtonnets, prismes, divers...

Le ciment Portland est un mélange de clinker et de sulfate de calcium (gypse) dans un rapport d'environ 95 à 5 %. Le clinker est produit par la cuisson d'un mélange finement broyé et homogène des deux composants à environ 1450°C ; le mélange de calcaire et d'argile (ou marne) est d'environ 80-20 %. Dans la zone de durcissement du four, quatre oxydes simples CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> jouent un rôle ; dans la chimie du ciment, ils sont respectivement appelés C, S, A, M Fer. Ils proviennent de calcaire et d'argile, qui se combinent pour former des silicates de calcium ainsi que des aluminates de calcium et des ferrites d'aluminium : Silicate tricalcique (C3S) : 3CaO·SiO<sub>2</sub> (Alite), représentant 50 à 70 % du clinker. Silicate Dicalcique (C2S) : 2CaO·SiO<sub>2</sub> (Belit) (10 à 30%). Aluminate tricalcique (C3A) : 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2 à 15%). Ferrite d'aluminium de calcium (ferrite d'aluminium tétracalcique) (C4AF) : 4CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (terre diatomée), (5 à 15%)

### 1.4 Constituants du ciment

#### 1.4.1 Farine crue

La farine crue présente un certain taux d'humidité. Le chauffage progressif, dans un domaine de température allant de 100°C à environ 250°C, entraîne l'élimination de l'eau absorbée par les minéraux argileux. Les ions hydroxydes (eau liée chimiquement) que contiennent les minéraux argileux et les hydroxydes de fer et d'aluminium quittent le réseau cristallin. La déshydratation des minéraux argileux se produit dans un large domaine de température allant de 250°C jusqu'à 1000°C et dépend du type de minéral, de la teneur en ajout, des dimensions

des grains, de la densité de tassement, de la conductivité thermique, de l'atmosphère gazeuse, etc. Mais la cinétique de déshydratation ne joue aucun rôle dans la cuisson du ciment. [6]

#### 1.4.2 Clinker

Après son refroidissement, le clinker se présente sous forme de nodules d'une dizaine de millimètre de diamètre (figure 1-2). Ces nodules comportent quatre phases cristallines synthétisées lors de la cuisson, soit deux silicates de calcium, et deux aluminates de calcium. Chaque phase possède ses propres propriétés hydrauliques. Les silicates sont sous forme de cristaux entourés d'une phase interstitielle moins bien cristallisée comportant les deux aluminates.[7]



Fig. 1- 2 : Clinker

Tableau 1-1 : La composition chimique de clinker

Composé	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
%	21,82	5,28	3,56	66,97	0,75	0,28	0,53	0,26

#### 1.4.3 Gypse

Le gypse est une espèce minérale composée de sulfate di hydraté de calcium de formule CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O. Le mot gypse désigne ainsi à la fois une espèce chimique et une roche. La Mine de Naica permet de voir des cristaux géants de ce minéral dépassant 11 mètres de long (Fig. : 1-3) Le gypse est le minerai qui permet de fabriquer le plâtre [8]



**Fig. 1-3 : Roche de gypse**

**Tableau 1-2 : La composition chimique de Gypse**

Composé	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
%	4.29	0.89	0.58	29.3	1.5	40.1	0.12	0.37

### 1.5 Matière première du clinker

Les matières premières sont nécessaires pour la fabrication du ciment sont extraites de roches naturelles calcaire et argile.

Afin de produire un ciment de qualité constante, les matières premières doivent être échantillonnées, dosées et mélangées très soigneusement pour obtenir des règles de composition complètes, qui peuvent varier d'une cimenterie à l'autre., selon la qualité du ciment Exploitation des gisements.

#### 1.5.1 Calcaire

Le carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) est très répondu dans la nature. Les différences les plus intéressantes en pratique sont la taille, la porosité et la dureté des cristaux. Le calcaire possède une structure micro granulée. Sa dureté varie entre 1,8 et 3,0 selon l'échelle de Mohs (Klingshirn, 2011) et sa densité de 2,6 à 2,8. Le calcaire renferme souvent des substances argileuses et des composés de fer, plus le calcaire est blanc plus il est pur.[9]



**Fig. 1- 4 : Roche de calcaire**

**Tableau 1-3 : La composition chimique de calcaire**

Composé	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
%	1,22	0,56	0,5	53,43	0,77	0,15	0,13	0,12

### 1.5.2 Argile

L'argile est constituée des substances diverses comme : les carbonates, la silice, l'alumine, les sulfures, l'oxyde et l'hydroxyde de fer, l'oxyde de manganèse, la matière organique, etc. Ces argiles peuvent être classées aux nombreux types en smectites, en kaolinite, en mica, en vermiculite, en pyrophyllite et en sépiolite. Les argiles sont constituées souvent de minéraux hydratés et les aluminosilicates dont la plupart appartiennent au groupe des phyllosilicates. Pour étudier de la structure générale des minéraux argileux. On doit étudier les structures, propriétés et les familles de phyllosilicates.[10]



**Fig. 1-5 : Argile**

**Tableau 1-4 : La composition chimique de l'argile**

Composé	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
%	45,63	14,15	5,88	9,16	1,83	0,41	2,24	0,03

### 1.5.3 Sable

C'est une matière minérale siliceuse ou calcaire qui se présente dans le sol sous la forme de grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin. Les sables proviennent de la désagrégation des roches qui constituent l'écorce terrestre ; suivant leur composition, ils sont blancs, jaunes, gris ou rougeâtres. On peut encore classer les sables d'après leur origine et distinguer les sables de carrière, les sables de mer et les sables de rivière. Le terrain dans lequel le sable grossier domine, manque d'homogénéité, sa trop grande perméabilité ne lui permet pas de retenir les engrais solubles, qui sont entraînés par les eaux avant d'avoir produit leur effet, amenant, en outre, l'assèchement rapide du sol. Des amendements sont nécessaires pour corriger les défauts des sols sableux ; l'apport de marne argileuse donne de la cohésion aux terrains qui en manquent, mais le fumier de ferme, en augmentant l'humus, est dans tous les cas le meilleur des traitements : il apporte au sable grossier l'agglomérant dont il a besoin et au sable fin l'allègement et l'aération qui lui font défaut. [11]

**Tableau 1-5 : La composition chimique de sable**

Composé	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
%	96,60	0,36	0,28	0,00	0,00	0,09	0,13	0,00

### 1.5.4 Minerai de fer

Le minerai de fer est une matière minérale composée de roches et de minéraux dont le fer métallique (Fe) peut être avantageusement extrait en présence d'agents réducteurs tels que le coke. Il se présente généralement sous forme de magnétite, d'hématite ou de ferrite associée au nickel et au cobalt.

Le terme "minerai de fer" est utilisé lorsque la roche contient suffisamment de fer pour être exploitée de manière rentable. [12]



**Fig.1-6** : Minerai de fer

**Tableau 1-6** : La composition chimique de minerai de Fer

Composé	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
%	33,05	0,66	35,36	19,69	0,00	0,00	0,01	0,08

### 1.6 Composants principaux du clinker

Ce sont les composants de base (C.S.A.F) qui entrent dans la formation de la phase minérale principale du clinker.

#### 1.6.1 Silice

Le dioxyde de silicium (SiO<sub>2</sub>), connu sous sa forme naturelle sous le nom de dioxyde de silicium, est un matériau extrêmement polymorphe aux nombreuses variantes : quartz  $\alpha$  et  $\beta$  tridymite  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  cristobalite  $\alpha$  et  $\beta$ , les densités obtenues sous pression dans la nature pour la silice vitreuse et la silice élevée. Trois espèces cristallines se trouvent dans la nature, le quartz  $\beta$  tridymite  $\gamma$  cristobalite  $\beta$  et la silice vitreuse (électro pyroxène).

#### 1.6.2 Alumine

L'alumine ou oxyde d'aluminium de formule **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** est le plus abondant oxyde métallique de la croûte terrestre après la silice. Elle existe sous forme hydratée dans un minerai naturel, la bauxite. Il existe plusieurs formes d'alumine plus ou moins hydratées :

- La bayerite, polymorphe de la gibbsite, de structure monoclinique, hydroxyde de
- Composition  $\alpha$ -Al (OH)<sub>3</sub> La boémite de structure orthorhombique, hydroxyde de

composition  $\gamma$ -AlOOH

□ Le corindon de structure hexagonale, oxyde de formule  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Au cours de la déshydratation, des phases métastables apparaissent. Elles sont mal cristallisées et quasi cubiques en adoptant presque toutes les lettres de l'alphabet grec :  $\epsilon$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\theta$ . cependant elles se convertissent toutes en oxyde  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (corindon) au-dessus de 1 000 °C. [13]

### 1.6.3 Oxyde de fer

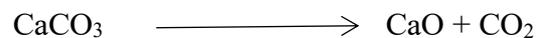
Les oxydes de fer existent sous de nombreuses formes. La magnétite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), la maghémite ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et l'hématite ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) sont les plus courantes. Le premier oxyde de fer découvert dans le sol est l'hématite qui est très stable thermodynamiquement sous les conditions atmosphériques et est la forme finale de nombreuses transformations d'autres types d'oxydes de fer.

La magnétite est également présente dans le sol. Elle n'est pas stable thermodynamiquement sous une atmosphère d'oxygène et possède le magnétisme le plus important parmi les oxydes de fer.

La maghémite est elle aussi présente dans le sol. Néanmoins, elle est métastable. [14]

### 1.6.4 Chaux

Le terme de chaux est générique. Il regroupe un grand nombre de produit, dont le seul point commun est d'être obtenu par calcination, c'est-à-dire chauffage à haute température de calcaire. La cuisson décompose le carbonate de calcium CaCO<sub>3</sub> qui est le principal constituant du calcaire, pour libérer le gaz carbonique CO<sub>2</sub>, et laisser la chaux vive CaO selon l'équation suivant :



La chaux vive CaO ne peut être utilisée directement, car son hydratation s'accompagne d'un gonflement inadmissible dans un ouvrage. Donc on procède à son hydratation de façon à ce que on obtienne une chaux éteinte Ca(OH)<sub>2</sub>, sous forme de poudre blanche, légèrement soluble dans l'eau, et présentant les propriétés d'un liant.[15]

## **1.7. Composants secondaires du clinker**

### **1.7.1 Oxyde de magnésium MgO**

L'oxyde de magnésium également appelé magnésie, est très peu soluble dans l'eau (6,2 mg/L) et possède une densité de 3,58 g/cm<sup>3</sup>. L'oxyde de magnésium a de nombreuses utilisations en fonction de sa réactivité : pigment pour les peintures, agent de neutralisation, engrais, supplément alimentaire pour le bétail. Lorsque la magnésie est frittée, elle est particulièrement stable à haute température et est utilisée en tant que matériau réfractaire et produit ignifugeant. La magnésie calcinée à très haute température est utilisée en tant que réactif pour la formation des ciments phosphomagnésiens.[16]

### **1.7.2 Alcalins K<sub>2</sub>O et Na<sub>2</sub>O**

Sont introduits dans le mélange des matières premières avec les argiles et les marnes. Durant la cuisson du ciment dans les fours rotatifs une partie des alcalis se volatilise dans la zone de clinkérisation et apparaît une circulation alcaline.

### **1.7.3 Sulfates SO<sub>3</sub>**

Dans la production du ciment, les sulfates est présent dans tous les mélanges des matières premières sous forme combinée et dans les combustibles. Dans la zone de cuisson, le soufre se transforme en gaz sulfureux (SO<sub>2</sub>), qui en réagissant avec les alcalis volatilisés et l'oxygène, forme des vapeurs de sulfate des métaux alcalins. Les sulfates se condensent dans la zone de préchauffage et retournent dans la zone de cuisson. L'excès de SO<sub>2</sub> dans la zone de préchauffage réagit avec CaCO<sub>3</sub> en formant CaSO<sub>4</sub>. Dans la zone de cuisson CaSO<sub>4</sub> se décompose en augmentant la concentration de SO<sub>2</sub> dans les gaz de circulation.[17]

### **1.7.4 Chlorure Cl**

Le mélange des matières premières contient souvent de 0,01 à 0,1% de chlorures (Cl) et dans les cas exceptionnels plus de 0,3%. Dans les fours, les chlorures réagissent avec les alcalis en formant les chlorures des métaux alcalins, qui seront transportés par les gaz et viendront se déposer dans la zone de préchauffage, puis ils retournent dans la zone de cuisson dans laquelle ils se volatilisent et il se produit une circulation continue entre la zone de cuisson et la zone de préchauffage qui peut causer l'arrêt du four. Les chlorures provoquent la corrosion de l'acier et présente donc, un danger pour les armatures du béton.[17]

### 1.7.5 Phosphores $P_2O_5$

La teneur des phosphores dans la plupart des crus est très faible (moins de 0,25 % de  $P_2O_5$ ). Une teneur en  $P_2O_5$  dépassant 0,5 % peut provoquer la diminution de la résistance initiale du ciment.

## 1.8 Procédés de fabrication de ciment

- **Processus général de fabrication du ciment.**

1. L'extraction de la matière (Calcaire) dans la carrière et son homogénéisation
2. La préparation des matières premières afin de constituer le cru (ou la pâte)
3. La cuisson aboutissant à la production du clinker
4. Le broyage du clinker et l'addition des ajouts avec le gypse pour fabriquer le ciment
5. Le stockage et l'expédition des ciments. [18]

### 1.8.1 Extraction de la matière – carrière

La carrière est située à 5,6 Km de l'usine, la matière première est extraite sur des fronts de 8 à 15 mètres par abattage et tirs de mines. Les blocs de calcaire extraits peuvent atteindre  $1\text{ m}^3$  de volume.

Les matières premières nécessaires à la fabrication du ciment, le calcaire et l'argile, sont extraites de carrières à ciel ouvert, à proximité de la cimenterie. [19]



**Fig. 1-7 :** Carrière de calcaire et l'argile.

## 1.8.2 Concassage

Les pierres arrivent généralement à l'usine en gros blocs et avec leur humidité de carrière, et il faut d'abord les concasser, puis les sécher, ou au contraire les délayer, avant de les passer au broyeur.

Pour choisir le type et les dimensions des machines, on tiendra compte de la nature et de la grosseur de la pierre, du degré de finesse désiré, et du rendement escompté.

Généralement le concassage est utilisé pour concasser les roches du calcaire qui ont une dureté importante par rapport à la roche d'argile.

Les principaux types de concasseurs utilisés en cimenteries sont :

- Le concasseur à mâchoires qui convient bien aux matériaux durs même abrasif mais non collants.

Le rapport de réduction (le rapport entre la dimension des plus gros éléments existant avant et après la réduction) peut être de 8 à 10 dans les meilleurs cas.

- Le concasseur giratoire.

- Le concasseur à cylindres dentés pour les matériaux humides très collants (rapport de réduction de 4 à 5).

- Le concasseur à marteaux pour les matériaux friables à mi-durs mais non abrasifs (teneur en silice inférieure à 5%). Le rapport de réduction peut être de 10 à 20). [20]

## 1.8.3 Préparation du cru

Transformation des matières premières à la farine.

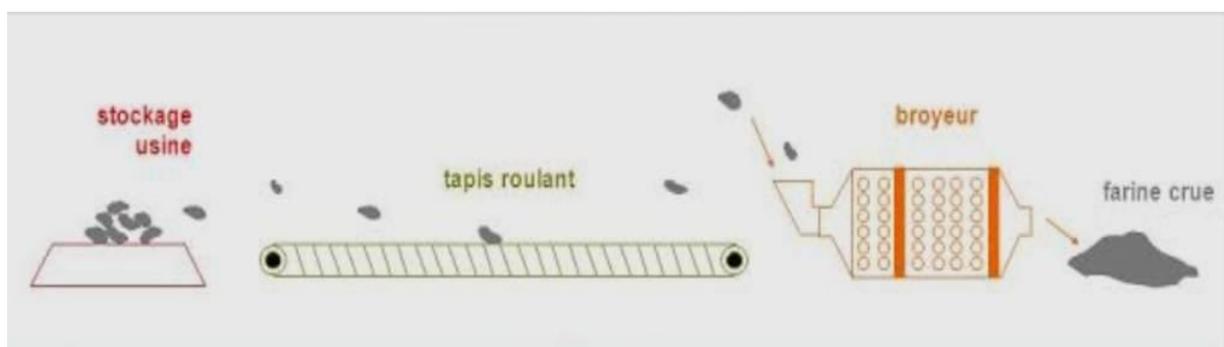


Fig. 1-8 : Etapes de préparation du cru

L'étude du gisement des matières premières permet de définir la composition exacte du cru avec les besoins en ajouts qu'exige le procédé de fabrication. La qualité et la régularité requises pour les matières premières assurent, au final, la qualité de ciment recherchée. Le ciment nécessite des teneurs proportionnées des différents composants : chaux, silice, alumine et oxyde ferrique. Le composant principal du mélange est le calcaire 80%, riche en carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) L'argile 20% est utilisée comme composant d'appoint.

Le résultat final doit permettre l'obtention d'un clinker dont la teneur moyenne des différents oxydes constitutifs est de l'ordre de :

65 % de  $\text{CaO}$  (fourchette de 60 à 69 %).

21 % de  $\text{SiO}_2$  (fourchette de 18 à 24 %).

6 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (fourchette de 4 à 8 %).

3 % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (fourchette de 1 à 8 %).

2 % de  $\text{MgO}$  (fourchette de 0 à 5 % maximum).

1 % d'alcalis (fourchette de 0 à 2 % maximum).

1 % de  $\text{SO}_3$  (fourchette de 0 à 3 % maximum).

La fabrication du ciment peut être réalisée suivant quatre procédés différents :

- Fabrication par voie humide (la plus ancienne).
- Fabrication par voie semi-humide (en partant de la voie humide).
- Fabrication par voie sèche (la plus utilisée).
- Fabrication par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche).[19]

#### **1.8.4 Pré homogénéisation**

La farine crue est très largement brassée dans des silos d'homogénéisation, de manière à obtenir une composition chimique et physique ciblée, la plus régulière possible.

#### **1.8.5 Broyage et séchage**

Le broyage et le séchage du cru sont réalisés à un débit de 300 t/h dans un broyeur à boulet à sortie centrale de 5 m de diamètre et de 13,9 m de longueur, avec un compartiment

de séchage et deux compartiments de broyage. L'entraînement est assuré par 2 moteurs de 1 650 KW.

La sélection granulométrique est réalisée au moyen d'un séparateur statique de 7,5 m et d'un séparateur dynamique de 7,2 m alimenté par deux élévateurs pouvant assurer chacun 60% du débit. Le séchage est assuré par les gaz de four à 320 – 330 °C en période normale pour une humidité de 5,5.

La préparation du cru au cours de laquelle on réalise le mélange homogène du calcaire, d'argile de sable et de minerai de fer, peut être réalisée suivant quatre procédés différents : la voie sèche, semi - sèche, semi - humide et humide.

- Dans La Voie Sèche : les matières premières sont parfaitement séchées et homogénéiser lors de broyage afin d'obtenir la farine ou crue.

La farine peut être ensuite introduite directement dans le four ou passer dans une tour de préchauffage.

- Dans La Voie Semi-Sèche : la farine mélangée à de l'eau forme des granulats qui sont introduits dans un préchauffeur à grilles situé en amont du four ou dans un four long équipé de croisillons.
- 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 granulats et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru.
- Dans La Voie Humide : les matières premières (dont la teneur en humidité est souvent élevée) sont broyées dans l'eau pour former une pâte pouvant être pompée.

Elle est ensuite introduite directement dans le four où peut passer auparavant dans un sécheur.[21]



**Fig. 1-9 :** Atelier broyage ciment.

### **1.8.6 Séparation**

Cette phase consiste, suivant le type de séparateur utilisé, à renvoyer au broyeur les particules insuffisamment broyées et à récupérer les fines contenues dans les gaz.

### **1.8.7 Homogénéisation**

Les deux silos servants de stockage et fonctionnement en continu, l'alimentation, le mélange et la vidange sont simultanées, la farine cru expédié par l'air lift est dégagé dans la boîte de récupération. La capacité de stockage de chaque silos est de 10, 000T, chaque silos est équipé de deux sorties latérales pouvant assurer la totalité du débit farines vers le four, il est donc possible de fonctionner avec un ou deux silos.[22]

### **1.8.8 Préchauffeur**

L'atelier comporte, en parallèle, deux préchauffeurs à 4 étages qui alimentent le four rotatif. Lors de cette étape, le mélange est introduit dans la partie supérieure de la tour de préchauffage pré calcination, qui est l'antichambre du four. A l'intérieur de la tour, quatre cyclones, sorte d'entonnoirs empilés les uns dans les autres, reçoivent tour à tour le cru qui en tombant en cascade, rencontre les gaz échappés du four. Le cru encore une fois brassé, commence donc à chauffer progressivement au fur et à mesure qu'il s'approche du four, Évitant ainsi le choc thermique du passage de 20°C à 1400°C quelques en secondes, le cru entame une procédure de décarbonatation. Pour cela, on ajoute un foyer supplémentaire dans le cyclone inférieur, qui maintient les gaz à une température plus élevée, entre 800°C et 1000°C. [7]

Cette technique est appelée "pré calcination", car le matériau arrive à l'entrée du four avec une température proche de celle de cuisson.

Le préchauffage qui s'effectue dans un échangeur de chaleur situé à l'amont du four, les gaz chauds provenant du four y brassant la farine à contre-courant.

- A 100°C : évaporation de l'eau mécanique ou eau libre.
- Entre 450 et 550°C : évaporation de l'eau de constitution (chimique) de l'argile.
- A partir de 700 °C : Décomposition du calcaire :  $\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- A partir de 750°C : Formation des aluminates et aluminoferrites de calcium :



- Vers 800°C : Formation du silicate bicalcique ( $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$ ) ou Bélite :



- A partir de 1250°C : le silicate tricalcique appelé 'alite' commence à apparaître à partir de la chaux et de la Bélite :



- Entre 1260 et 1450°C : apparition du premier liquide (Clinkérisation).

La cuisson est une opération forte consommatrice d'énergie. La source de chaleur est apportée par une tuyère qui peut brûler différents combustibles : (gaz naturel, fuel, charbon, coke de pétrole) [19].

### 1.8.9 Four rotatif

Il s'agit de la pièce maîtresse de la cimenterie. Le four constitué par une virole cylindrique de 90m de long et de 5.6m de diamètre protégé par de la brique réfractaire, incliné de trois pour cents par rapport à l'horizontale. La flamme, élément principale du four, est environ 2000°C, elle est issue de la combustion de gaz naturelle.

C'est dans le four que se produisent les transformations physiques et chimiques qui vont transformer le cru en clinker.

Dans l'ordre simplifiant à l'extrême, la crue est introduite dans le four, pour suit sa déshydratation, préalablement entamée dans la colonne de préchauffage, puis vers 1000-

1200°C, se produit la décarbonatation, c'est à dire que le calcaire se transforme en chaux. Puis il y a une phase de Clinkérisation, au cours de laquelle les composants définitifs du ciment apparaissent. Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile, se combinent à la chaux provenant du calcaire.[23]



**Fig. 1-10** : Zone de cuisson

#### **1.8.10 Refroidissement**

Cette opération a pour but d'abaisser la température du clinker qui est de l'ordre de 1200 à 1450 °C à la sortie du four à environ 50/250 °C suivant les types de refroidisseurs. Cette opération a également une incidence sur la qualité du ciment, un refroidissement trop lent pouvant amener la libération de chaux libre et la transformation du C3S en C2S qui entraîne une baisse des résistances.[24]

#### **1.8.11 Stockage de clinker**

La manutention du clinker est réalisée par des transporteurs métalliques vers les deux stocks polaires principaux de capacité unitaire de 30 000 t. Un troisième stock de 3 000 t est réservé pour les incuits. L'extraction de clinker est assurée par des extracteurs vibrant. [25]

#### **1.8.12 Broyage de clinker**

Il est réalisé en continu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts.

Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granulats de clinker en poudre, d'autre part, de procéder à l'ajout du gypse (dont le rôle est de réguler le phénomène de prise),

ainsi qu'à celui des éventuels autres constituants (pouzzolane, calcaire sable) ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés. [26]

### 1.8.13 Stockage, Ensachage et Expédition

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de grandes capacités qui alimentent par la suite les ateliers d'ensachage pour les l'expédition en sacs, ou les dispositifs de chargement et livraisons en VRAC. Donc les expéditions comprennent le stockage du ciment, son conditionnement (ensachage) en cas de livraison par sacs ou via un vrac et son chargement sur l'outil de transport (camion). C'est l'interface de l'usine avec le client.[27]



**Fig. 1-11 : Silos de stockage**

## 1.9 Ajouts cimentaires

Les ajouts minéraux sont des matériaux que l'on mélange au ciment Portland et donnent certaines propriétés au béton, grâce à leurs activités hydrauliques et/ou pouzzolaniques. L'utilisation d'ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques. Parmi ces ajouts on peut citer :

- Les laitiers vitrifiés moulus granulé de haut fourneau.
- Les cendres volantes.
- Les additions calcaires.
- Les fumées de silice.
- Les pouzzolanes.[28]

### **1.9.1 Laitiers de haut fourneau**

Les laitiers sont des sous-produits de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques. Ce sont des silico-aluminates de chaux traités de différentes façons à la sortie du haut fourneau :

- Par refroidissement brusque dans l'eau ou dans l'air : ceci empêche la cristallisation et permet son utilisation dans les ciments et les bétons comme pouzzolane,
  - Par refroidissement lent à l'air : ceci donne un matériau cristallisé sans aucun pouvoir liant qui est utilisé comme granulats pour les travaux routiers et dans les bétons.
- En Europe, les laitiers sont en général ajoutés au ciment. On parle de ciment au laitier. En Amérique du nord, ils sont incorporés directement dans le béton.[29]

### **1.9.2 Cendres volantes**

Les cendres volantes constituent un produit minéral pulvérulent résultant du dépoussiérage des fumées rejetées par les centrales thermiques qui utilisent du charbon broyé comme combustible. Elles possèdent la propriété d'être pouzzolaniques (cendres volantes silico-alumineuses) provoque, en présence de la chaux, la formation de composés ayant des propriétés liantes comparables à celles d'un liant hydraulique.

Les cendres volantes sont principalement composées de silice, d'alumine et de petites quantités d'oxydes alcalins et alcalino-terreux, y compris la chaux à l'état composite. Leur composition chimique varie en fonction de la source de charbon.[30]

### **1.9.3 Filles calcaires**

Les fillers utilisés sont très souvent d'origine minérale. Leur principal intérêt est de diminuer le coût global du matériau. Le taux de substitution au ciment peut atteindre 30%. L'utilisation des fillers calcaires dans l'industrie du ciment et du béton est assez récente. Ils sont soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires et peuvent alors contenir des résidus argileux et des matières organiques, soit obtenus par broyage fin de roches calcaires de manière à répondre aux critères de conformité de la norme sur les additions minérales calcaires.

Ces additions s'insèrent dans le squelette granulaire du ciment, et permet donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats). L'effet, appelé effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci d'après.[31]

### **1.9.4 Fumés de silice**

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication de silicium obtenu dans un four à arc à partir de quartz de grande pureté et de charbon.

La fumée de silice se présente sous forme de particules sphériques de diamètre variant de 0,03 à 0,3  $\mu\text{m}$ . Les particules de silice sont sous forme amorphe. Etant très fine et de très faible masse volumique en vrac (de 200 à 300  $\text{kg/m}^3$ ), la fumée de silice est aussi disponible sous forme densifiée ou sous forme de suspension.

Ces fumées sont communément ajoutées au béton, afin d'améliorer la résistance mécanique de celui-ci ainsi qu'à des fins d'amélioration de sa résistance à la corrosion en environnement agressif (durabilité).

Ces fumées de silice jouent ainsi le rôle de « filler » grâce à leur grande finesse (remplissage de la porosité), et aussi de matériau pouzzolanique grâce à son aptitude à réagir avec le calcium libre du ciment pour former des silicates hydratés C-S-H. [32]

### **1.9.5 Pouzzolanes**

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25 %), d'alumine et d'oxyde de fer.[33]

## **1.10 Intérêt de l'utilisation des ajouts**

Les ajouts cimentaires ont des bénéfices fonctionnels, économiques et écologiques :

### **1.10.1 Bénéfices fonctionnels**

- L'incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau
- Amélioration des propriétés mécanique et de la durabilité de béton
- Diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue à fissuration d'origine thermique.

### **1.10.2 Bénéfices économiques**

- La plupart des ajout minéraux sont des sous-produits de différentes et des ressources naturelles, leur coût et souvent égale au coût du transport et de la manipulation.
- Comme la production du ciment est un grand consommateur d'énergie, son remplacement par des ajouts minéraux réduit le prix du béton pour le coût du traitement.

### **1.10.3 Bénéfices écologiques et environnementaux**

- Diminution de l'émission du CO<sub>2</sub> par l'industrie cimentière.
- Élimination des sous-produits de la nature.
- Élimination des sous-produits et déchets industriels. [34]

# **Chapitre 2 :**

## **Matériels et méthodes**

## **2.1 Introduction**

Dans cette partie de notre travail, nous présentons l'ensemble de matériels et méthodes utilisés pour la préparation des différents types de ciment.

Les matériaux utilisés dans cette étude expérimentale sont des matériaux locaux purs, le clinker principalement constitué d'argile et de calcaire et de gypse abandonnés dans la nature.

L'étude expérimentale a été réalisée au niveau du laboratoire de la cimenterie de Meftah.

## **2.2 Matériaux utilisés**

Les principaux composants utilisés sont :

- **Clinker** : il est utilisé dans notre étude est fabriqué par la cimenterie de Meftah.
- **Gypse** : il est utilisé comme régulateur de prise est extrait du la carrière de Meftah
- **Calcaire** : il est utilisé provient de la carrière de Meftah et est utilisé comme additif

### **2.2.1 Protocole de préparation des échantillons de ciment**

Dans cette partie, nous avons préparé 5 échantillons à partir de deux types de ciment :

- Le premier ciment sans ajout CPA CEM I obtenu de la cimenterie de Meftah

Clinker (95 à 100%), gypse : (0 à 5%), et ajout 0% qui est utilisé comme un échantillon témoin.

- Le deuxième ciment avec ajout CPJ CEM II/A-L 42,5N obtenu de la cimenterie de Meftah.

Nous avons préparé les échantillons de ciment selon un protocole qui consiste d'abord à apporter les matières premières clinker, gypse et calcaire, puis nous avons mélangé les échantillons où nous avons fixé la masse de gypse (5%) ensuite nous avons éliminé un certain pourcentage de clinker (5%) dans chaque essai et remplacé la masse restante par la chaux et à chaque fois comme ça jusqu'à ce que nous obtenions 5 échantillons, puis nous avons broyé chaque échantillon séparément à l'aide d'un broyeur à disque, ainsi les échantillons sont prêts pour les analyses chimiques et physico-mécaniques.

Les différentes formulations possibles sont données dans le tableau 2.1. Suivant

**Tableau 2-1 : La composition du ciment à analyser à Meftah**

Les échantillons	Type de ciment	Clinker	Gypse	Calcaire
Echantillon 1	CEM I / 42,5 N	95%	5%	0%
Echantillon 2	CEM II / A 42,5 N	90%	5%	5%
Echantillon 3	CEM II / A 42,5 N	85%	5%	10%
Echantillon 4	CEM II / A 42,5 N	80%	5%	15%
Echantillon 5	CEM II / A 42,5 N	75%	5%	20%

Après avoir préparé les échantillons, nous les broyons à l'aide d'un broyeur à disque.



**Fig. 2-1 : Broyeur à disque**

## **2.3 Caractérisation des échantillons de ciment préparés**

### **2.3.1. Analyses chimiques**

Les méthodes d'analyse chimique utilisées au niveau de la cimenterie de Meftah, sont effectués selon la norme européenne (EN 196-2) et la norme Algérienne (NA 5042)

#### **A. Détermination de la chaux libre**

La chaux libre est déterminée par titrage avec de l'acide chlorhydrique après extraction à l'aide de l'éthylène glycol.

#### **-Produits utilisés**

- HCl 0,1N
- Ethylène glycol
- Vert de bromocrésol

#### **-Matériels utilisés**

- Erlenmeyer de 250ml
- Papier filtre
- Verre de monté
- Bain marie
- Eprouvette
- Balance de précision

#### **-Mode opératoire**

Tout d'abord, on a pesé 1g d'échantillon dans un Erlenmeyer de 250 ml, puis ajouté 50 ml d'éthylène glycol, puis agité et mis l'Erlenmeyer au bain-marie pour chauffer à 80°C pendant 5 minutes, et ajouter ensuite 2 à 3 goutte de vert bromocrésol et titrer avec HCl (0,1N) de même que la couleur de la solution passe de bleu au jaune, enfin noté le volume de HCl .

- **Expression des résultats :**

$$\%CaO = F \times V(HCl) \dots\dots\dots (1)$$

Avec :

**F** : facteur de la solution (F =0,272)



**Fig. 2-2 :** Ethylène glycol



**Fig. 2-3 :** Filtration de la solution sous vide

### **B. Détermination de la perte au feu**

La perte au feu décrit le processus de mesure de la variation de poids d'un échantillon après le chauffage à haute température, ce qui provoque la combustion ou la volatilisation d'une partie de son contenu.

#### **-Matériels utilisés**

- Creusets en céramique
- Balance analytique précision de  $\pm 0,1$ mg
- Four à moufle  $950^{\circ}C \pm 25^{\circ}C$
- Dessiccateur

### -Mode opératoire

Tout d'abord, le creuset en céramique vide est pesé, sa masse est  $m_1$ . Une masse de  $1 \pm 0,05$ g de l'échantillon est ajoutée au creuset. L'ensemble est pesé, sa masse est  $m_2$ . Le creuset rempli est placé dans le four à moufle dont la température est stabilisée à  $950^\circ\text{C} \pm 25^\circ\text{C}$ . Après 15 min de chauffage, le creuset est placé dans un dessiccateur à température ambiante. Une fois le creuset rempli est refroidi sa masse est pesée à nouveau. Sa masse est  $m_3$ .

La perte au feu est calculée en pourcentage par la formule suivant :

$$\%PF = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

**Avec :**

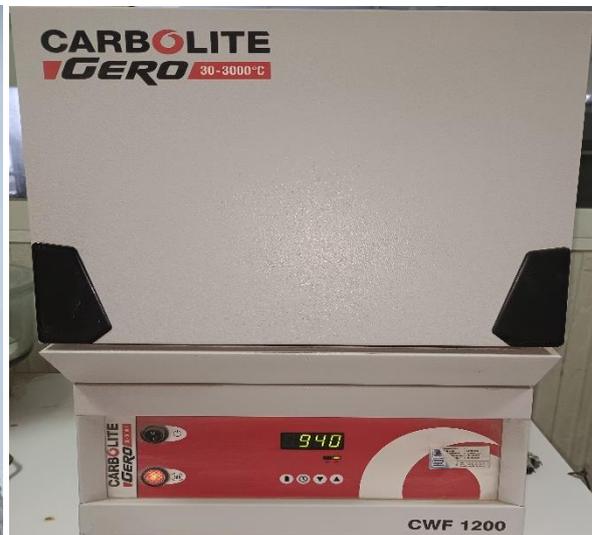
**$m_1$**  :masse du creuset vide

**$m_2$**  :masse du creuset +échantillon

**$m_3$**  :masse du creuset + échantillon après calcination



**Fig. 2-4 :** Creusets en céramique



**Fig. 2-5 :** Four à moufle

### c. Analyse Par Spectrométrie de Fluorescence X (XRF)

La spectrométrie de fluorescence X (SFX ou FX) est une technique d'analyse permet de qualifier les éléments chimiques présents dans un échantillon (exemple : Calcium, Silicium) et quantifier les éléments présents (exemple : 70% calcium, 8% silicium).

#### -Matériels utilisés

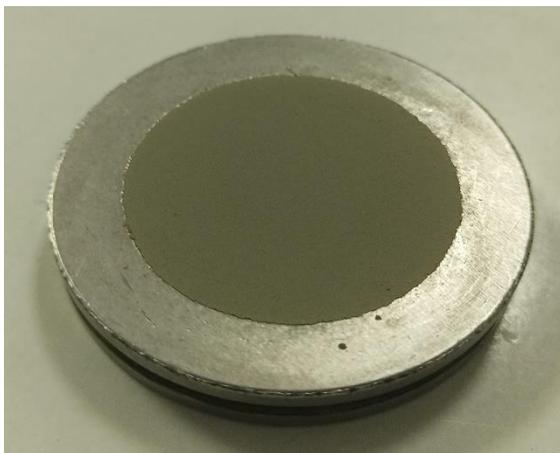
- Balance de précision de 0,1mg
- Verre de monte
- Pastilleuse
- Anneau
- Appareil de Fluorescence X

#### -Mode opératoire

##### 1. Préparation des pastilles

Tout d'abord on a pesé 10g de la matière à analyser à l'aide d'une balance, puis on a ajouté 0,6g de cellulose on a mis dans la pastille, puis mis elle dans une pastilleuse sous une pression de 300KN, et avec cela on a eu une pastille prête pour l'analyse chimique par XRF.

Ensuite on a mis la pastille dans l'appareil de Fluorescence X qui à permet d'identifier les éléments présents dans la matière et de déterminer leur concentration.



**Fig. 2-6 :** Pastille



**Fig. 2-7 :** Appareil de Fluorescence X

### 2.3.2. Analyses physico-mécaniques

Les essais physiques sont principalement réalisés sur le ciment (mesure de la finesse par tamisage alpine), sur la pâte c'est-à-dire : ciment plus eau (mesure du temps de prise) ainsi que sur le mortier (résistances mécaniques à la compression) [35]

#### A. Détermination de Refus

Le refus est déterminé pour vérifier l'état de fonctionnement du broyage et le degré du broyage. L'essai effectué se fait conformément à la norme Algérienne (NA 231)

#### - Matériels utilisés

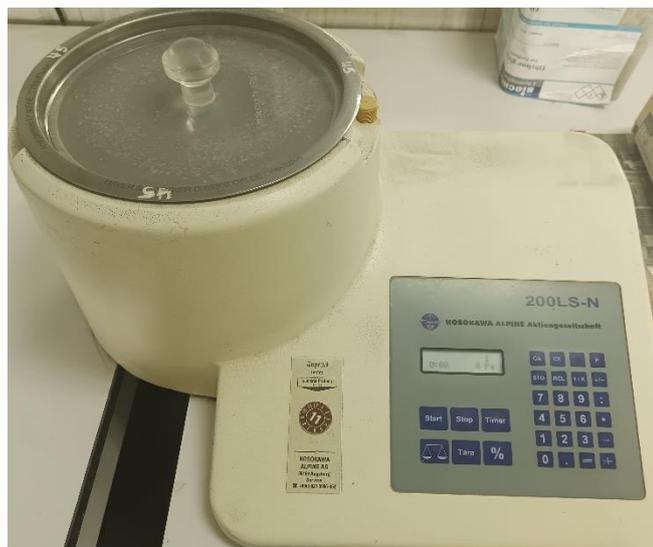
- Tamiseuse Alpine
- Balance
- Verre à monté
- Spatule

#### -Mode opératoire

Tout d'abord 25 g de l'échantillon est pesé ensuite tamisé (tamis de 45  $\mu\text{m}$ ), à l'aide d'une tamiseuse Alpine sous pression 1800 Pa pendant 3 min, les résidus obtenus dans le tamis qui représente le pourcentage de refus.



**Fig. 2-8 :** Tamis 45 $\mu\text{m}$



**Fig. 2-9 :** Tamiseuse Alpine

## **B. Détermination de la surface spécifique Blaine SSB**

Pour la détermination de la finesse du ciment ou bien le degré de broyage. L'essai effectué se fait conformément à la norme européenne (EN 196-6) et (NA 231)  $3600 \pm 200$  (cm<sup>2</sup>/g)

La surface spécifique (finesse Blaine) permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment.

Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment (norme NF EN 196-6).

Elle s'exprime en cm<sup>2</sup>/g. suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2800 et 5000 cm<sup>2</sup>/g

L'essai consiste à mesurer le temps mis par une quantité d'air pour traverser un lit de ciment compacté à une dimension et une porosité spécifique. La surface massique est proportionnelle au temps mis pour traverser la couche de ciment.

### **-Matériels utilisés**

- Piston
- Papier filtre
- Corps de cellule
- Ciment
- Grille
- Appareil perméabilimètre BLAINE

### **-Mode opératoire**

Tout d'abord on a placé la grille au fond de la cellule, appliqué sur cette grille au moyen d'une tige à face intérieure plein. Un disque neuf de papier filtre. Ensuite versé le liant dans la cellule en utilisant un entonnoir. Donnés quelques légères secousses à la cellule pour niveler la couche supérieure du liant. Puis placé sur celle-ci un autre disque neuf de papier filtre. Ensuite tassé avec précaution au moyen du piston en évitant la remontée de la poudre au-dessus du papier filtre jusqu'à ce que le collier vienne buter contre le haut de la cellule. Puis retiré le piston lentement. En fin vérifié le niveau du liquide du manomètre qui doit affleurer au trait inférieur.



**Fig. 2-10 : Perméabilimètre BLAINE**

### **C. Détermination de la résistance (par compression)**

Le but est compté est 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.

L'essai effectué se fait conformément à la norme européenne (EN 196-1) et la norme Algérienne (NA 234)

$$2j \geq 10 \text{ MPa} \quad 28j \geq 42.5 \text{ MPa}$$

#### **-Matériels utilisés**

- Ciment
- L'eau distillé
- Sable normalisé
- Malaxeur
- Moule du mortier
- Appareil à choc
- Enceinte humide
- Presse d'écrasement
- Conservateur

## -Mode opératoire

### 1. Préparation des mortiers

Tout d'abord on a versé 225ml l'eau distillé dans le récipient et introduit 450g de ciment soigneusement. Puis mis alors le malaxeur en marche à petite vitesse. Après 30 seconde, introduit 1350 g de sable normalise et continuer à malaxer pendant autres 30s, après arrêter le mouvement pendant 90 seconds, repris le mélange pendant 2 minutes à la vitesse rapide. Les opérations du malaxage se fait selon la norme ( EN 196-1)



**Fig.2-11** : Préparation du mortier

### 2. Moulage des éprouvettes

Les éprouvettes sont moulées par l'appareil à chocs, tout d'abord on a remplié avec précaution à l'aide d'une cuillère convenable, ensuit égaliser la surface du mortier, puis mis la machine en marche pour 60 chocs. Ensuite arasé le mortier avec l'arête d'une règle métallique, à la fin on a placé les éprouvettes dans une enceinte humide à la température de  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ .



**Fig.2-12 : Moulage des éprouvettes**

### 3. Conservation des éprouvettes dans l'eau

Après 24h on a démoulé les éprouvettes des moules. Ensuite on a immergé les éprouvettes dans les bacs contenant de l'eau à  $20 \pm 1^\circ\text{C}$



**Fig.2-13 : Conservateur.**

Le but de l'essai est de déterminer la résistance mécanique à la compression aux âges 02, 07, 28 jours.

Avant de commencer l'essai, nous exposons les éprouvettes à l'air pour gagner de l'humidité environnante. Les essais de compression sont effectués par une presse de type Perrier d'une charge de 200KN.



**Fig.2-14** : Presse de compression

#### **D. Détermination le Temps de prise**

Le but de L'essai de prise est déterminé le temps de prise c'est à dire la durée qui s'écoule entre l'instant où le liant a été mis en contact avec l'eau de gâchage et le début de prise.

L'essai effectué se fait selon la norme (EN 196-3) (NA 230)  $\geq 60$  min

La présence de régulateur de prise dans la masse des liants hydrauliques offre à ces derniers, après gâchage, une prise qui commence après quelques heures. Il est donc nécessaire de connaître le temps de début de prise des liants hydrauliques en vue de déterminer le temps disponible pour la mise en œuvre in situ des mortiers et des bétons dont ils sont confectionnés. Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui donne deux repères pratiques : le début de prise et la fin de prise.

#### **-Matériels utilisés**

- Appareil de VICAT
- Malaxeur démontable
- Balance électronique
- Ciment

## -Technique des essais

### 1. Détermination du début de prise

- L'aiguille de Vicat, descendue perpendiculairement à la surface de la pâte et immobilisée pendant un court arrêt quand elle entre en contact avec cette surface est abandonnée à elle-même sans vitesse initiale.
- Observer l'enfoncement de l'aiguille ; les observations sont renouvelées jusqu'à constatation du début de prise.
- Ces différentes observations sont effectuées sur moule immergé ou extrait de l'ambiance de conservation pendant un temps ne dépassant pas 5 mn et en des points différents.
- Les points de mesurer doivent être écartés d'au moins 1,5 cm de la paroi du moule et de 2,0 cm entre eux.

### 2. Détermination de fin de prise

Elle correspond au moment où l'aiguille cesse de s'enfoncer et s'arrête à une distance inférieure à 2 mm de la face supérieure du moule tronconique rempli de la pâte normale.



**Fig.2-15** : Appareil de VICAT

# **Chapitre 3 :**

## Résultats et discussions

Dans ce chapitre nous présentons les résultats et les discussions des différents essais effectués sur le ciment sans ajout (CPA CEM I) et ciment avec ajout (CPJ CEM II) au niveau de laboratoire d'analyse chimique et physico-mécanique de la cimenterie de Meftah.

Afin de mesurer l'influence de l'ajout calcaire sur les propriétés chimiques et physico-mécaniques de ciment.

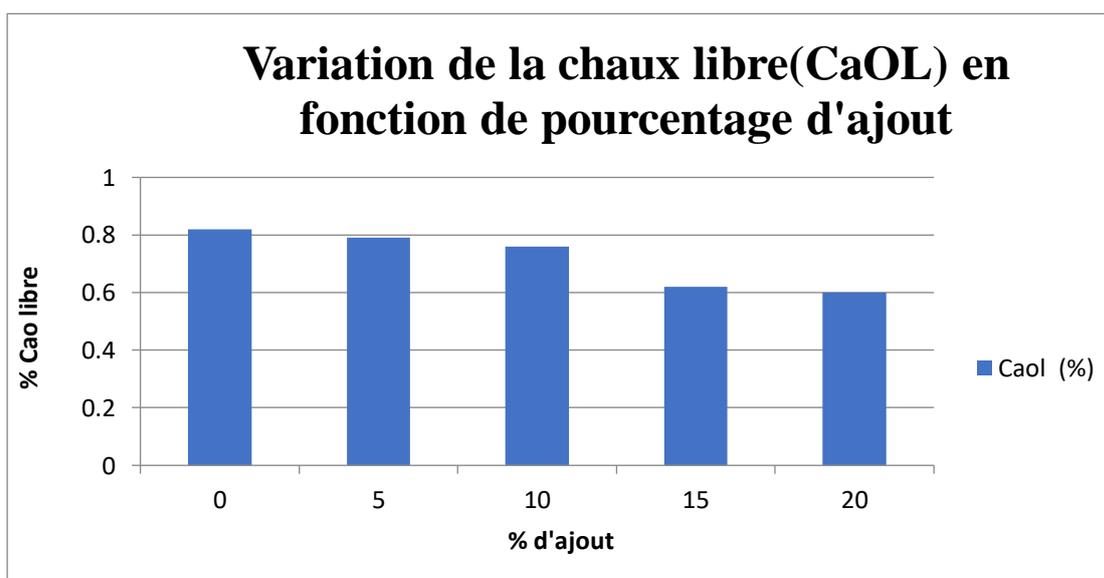
### 3 Les résultats des caractéristiques chimiques des échantillons

#### 3.1 Résultats de l'influence de l'ajout de calcaire sur la chaux libre

Le tableau 3-1 représente les résultats de pourcentage de la chaux libre en fonction du pourcentage d'ajout.

**Tableau 3-1 :** Influence du taux d'ajout sur la chaux libre CaO.

Pourcentage d'ajout (%)	CaO L (%)	HCl (ml)
0	0,82	3
5	0,79	2,9
10	0,76	2,8
15	0,62	2,3
20	0,60	2,2

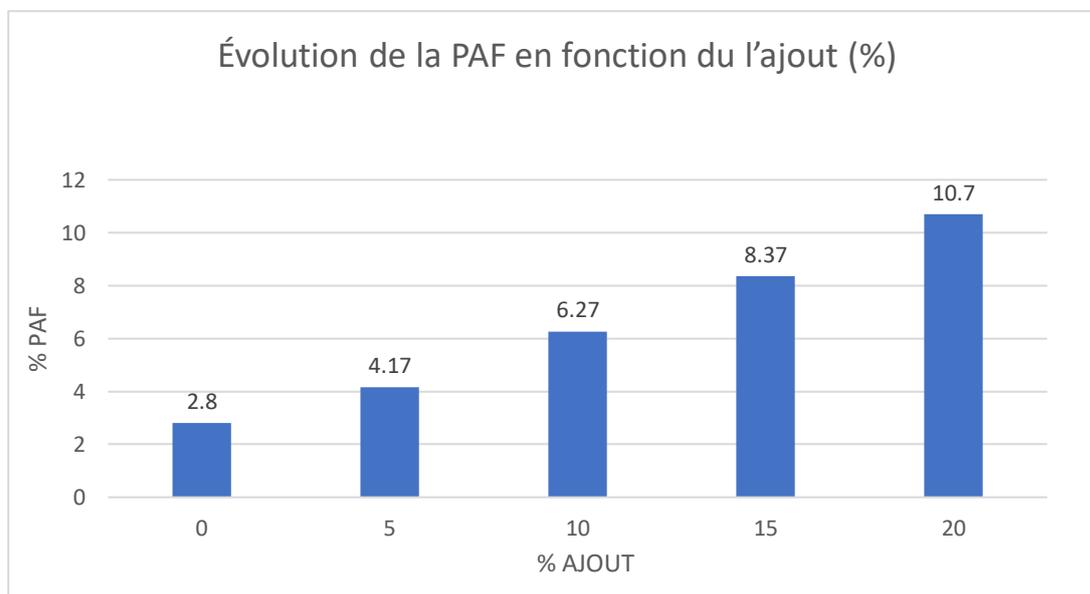


**Fig. 3-1 :** Variation de la CaO libre en fonction du pourcentage d'ajout.

On remarque que pour le ciment sans ajout le pourcentage de la chaux libre est très élevé, et plus la fraction d'ajout augmente plus la chaux libre diminue, la diminution de la chaux libre dans le ciment à mesure que le pourcentage d'ajout de calcaire augmente est principalement due au remplacement du clinker. En effet, le clinker est la source principale de la chaux libre dans le ciment.

### 3.2 Résultats de l'influence de l'ajout de calcaire sur la perte au feu

Figure 3-2 représente la variation de la perte au feu en fonction du pourcentage d'ajout



**Fig.3-2 :** Évolution de la PAF en fonction du pourcentage l'ajout.

On remarque l'ajout du calcaire influe sur la perte au feu lorsque, le pourcentage d'ajout augmente la perte au feu augmente, il indique qu'il y a une relation positive forte (croissante) entre la PAF et l'ajout.

### 3.3 Résultats d'analyse de fluorescence X (XRF)

L'analyse par spectrométrie fluorescence X réalisée sur les échantillons consiste à déterminer la composition chimique des éléments présente dans l'échantillon ainsi que leur pourcentage.

**Tableau 3-2 :** Composition chimique des échantillons analysée par XRF

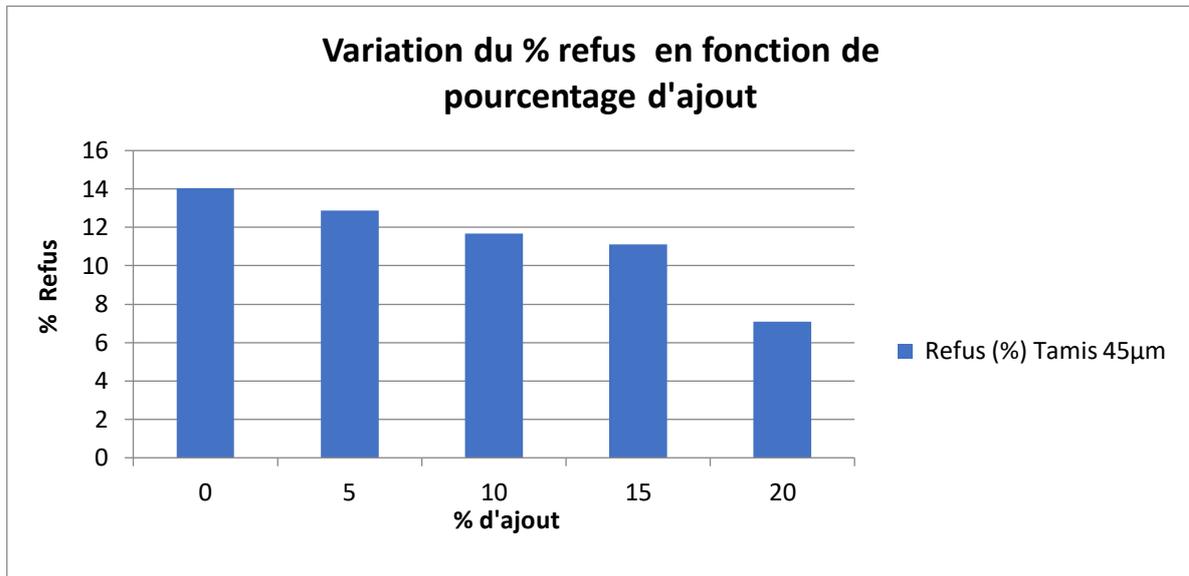
% ajout	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
0	20,45	4,8	3,72	64,12	1,32	2,28	0,74	0,35
5	22,19	5,51	3,95	61,41	1,14	2,32	0,99	0,33
10	25,69	6,55	3,98	55,79	0,99	2,35	1,2	0,17
15	27,97	7,61	4,21	53,26	1,09	2,37	1,44	0,16
20	31,24	8,92	4,31	50,09	1,21	2,4	1,63	0,20

On remarque que plus le pourcentage d'ajout augmente plus que l'oxyde de calcium (la chaux) diminue, et cela est dû à la diminution de clinker qui est le responsable de la libération de l'oxyde de calcium.

## 4 Résultats des caractéristiques physiques et mécaniques des échantillons

### 4.1 Résultats de l'influence d'ajout sur le refus

Figure 4-1 représente la variation du refus en fonction du pourcentage d'ajout

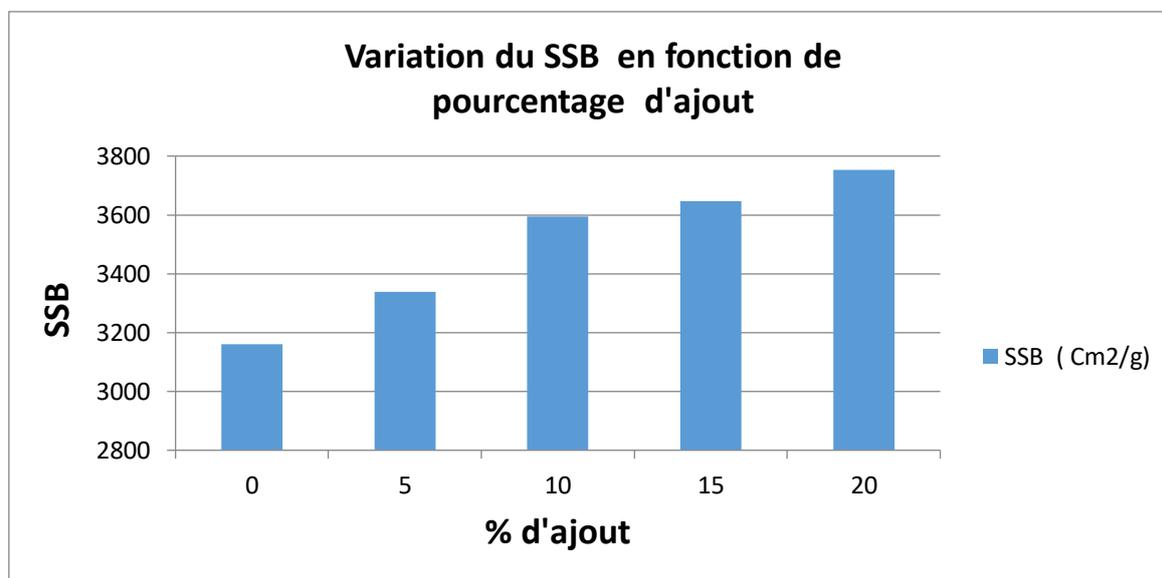


**Fig. 4-1 :** Variation du % Refus en fonction du pourcentage d'ajout.

- A partir des résultats obtenus, il ressort qu'il y a une diminution du pourcentage de refus avec l'augmentation du pourcentage d'ajout
- Travers la tendance du pourcentage de ciment de [15%-20%], nous remarquons une forte diminution du pourcentage de refus, car le pourcentage d'ajout est élevé par rapport aux autres ratios, donc le pourcentage de refus diminue, et à partir de là nous concluons ce qui suit :
- Il existe une relation inverse, plus le pourcentage d'ajout est élevé, plus le pourcentage de refus dans le ciment est faible.

## 4.2 Résultats de l'influence de l'ajout de calcaire sur la surface spécifique

Figure 4-2 représente les résultats de pourcentage de la surface spécifique en fonction du pourcentage d'ajout.



**Fig.4-2 :** Variation de la surface spécifique en fonction du pourcentage d'ajout.

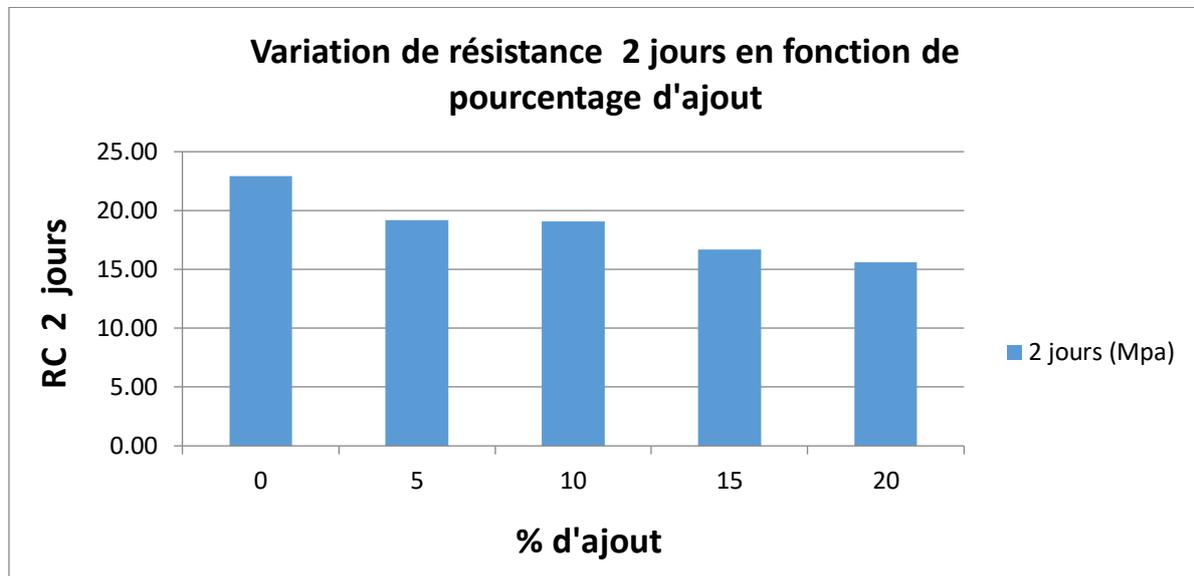
La variation de surface spécifique de Blaine est une mesure utilisée dans l'industrie du ciment pour évaluer la finesse d'une poudre de ciment. Elle est exprimée en mètres carrés par kilogramme ( $m^2/kg$ ) et indique la surface totale en mètres carrés que les particules de ciment couvrent par unité de poids. Cette mesure est importante car elle peut influencer les propriétés du ciment, telles que sa résistance et sa durabilité.

La variation de surface spécifique de Blaine peut varier en fonction de divers facteurs, tels que la composition chimique du ciment, le temps de broyage et les conditions de fabrication. Une variation significative de cette mesure peut avoir un impact sur la qualité du ciment et son comportement dans les applications de construction.

En résumé, la variation de surface spécifique de Blaine est une mesure essentielle pour évaluer la finesse du ciment, ce qui peut avoir des conséquences sur ses performances dans les projets de construction.

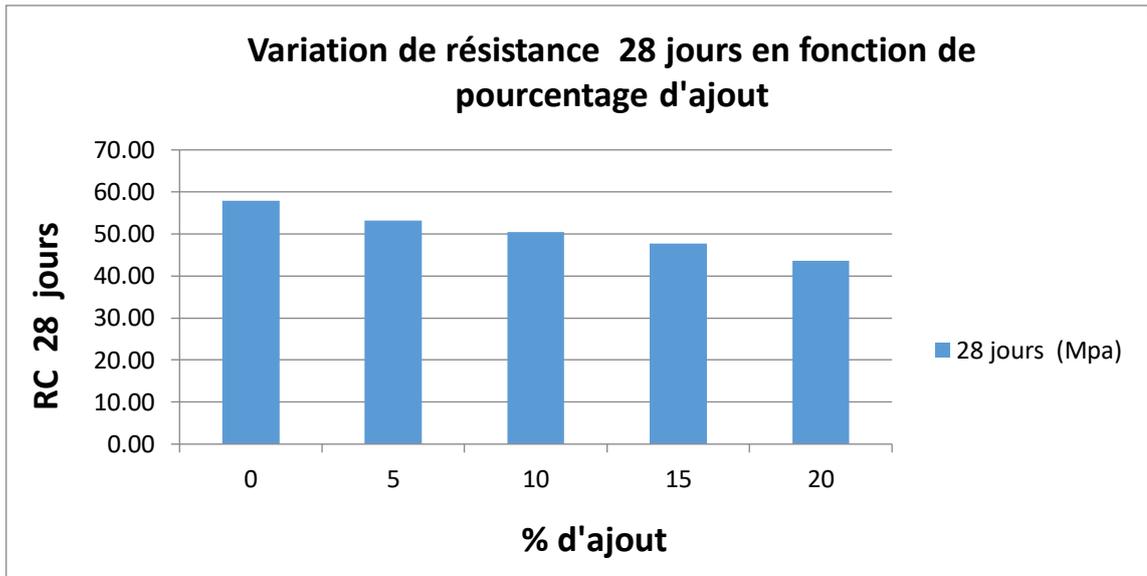
### 4.3 Résultats de l'influence de l'ajout de calcaire sur la résistance

Figure 4-3 et figure 4-4 représentant les résultats de pourcentage de la résistance en fonction du pourcentage d'ajout.



**Fig.4-3 :** Variation de la résistance de 2 jours en fonction du pourcentage d'ajout.

L'histogramme représente les variations de résistance (2 jours) en fonction de pourcentage d'ajout, le mortier sans ajout (0%) présente la valeur maximale de la résistance (22 ,90 MPA) ce mortier constitue notre repère. La valeur de la résistance diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.



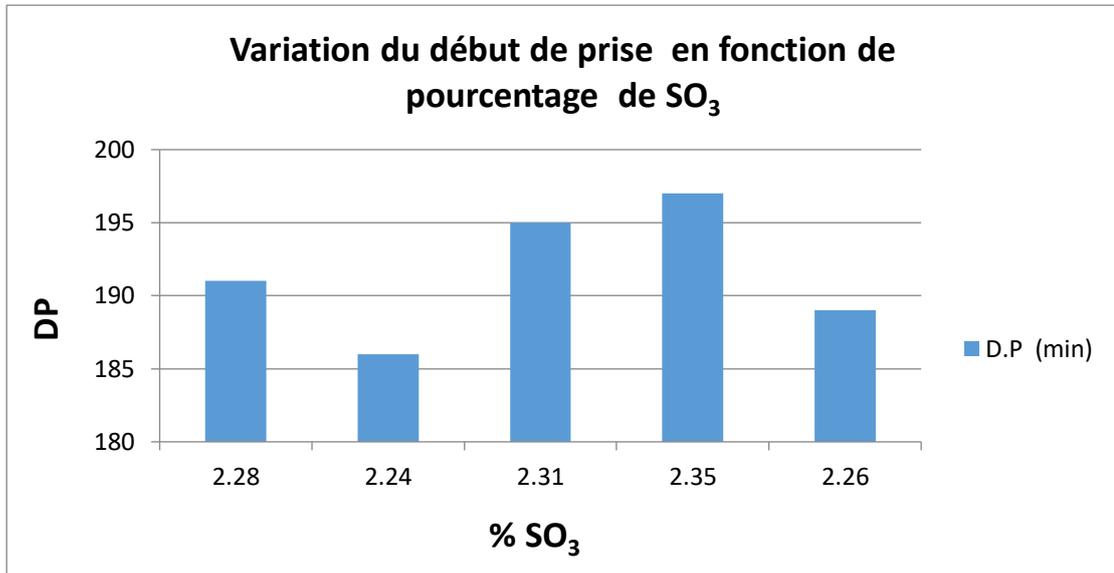
**Fig.4-4 :** Variation de la résistance de 28 jours en fonction du pourcentage d’ajout.

L’histogramme représente les variations de résistance (28 jours) en fonction de pourcentage d'ajout. Le mortier sans ajout (0%) présente la valeur maximale de la résistance (57 ,90 MPA) ce mortier constitue notre repère. La valeur de la résistance diminue avec l’augmentation du pourcentage d'ajout.

L’ajout de calcaire peut diluer la concentration de clinker dans le ciment. Le clinker est principalement responsable du développement de la résistance du ciment. Par conséquent une augmentation de l’ajout de calcaire peut réduire la teneur en clinker et potentiellement affecter la résistance du ciment.

#### 4.4 Résultats de l'influence de SO<sub>3</sub> sur début de prise

Figure 4-5 représente la variation du débit de prise en fonction de pourcentage d'ajout



**Fig.4-5 :** Variation de début de prise en fonction de SO<sub>3</sub>.

L'influence de SO<sub>3</sub> (anhydride sulfureux) sur le début de prise se réfère généralement à son rôle dans le processus de prise du ciment, en particulier dans le contexte de la construction et de la fabrication du béton. SO<sub>3</sub> peut être présent dans certains types de ciments en quantités variables.

En général, une augmentation de la teneur en SO<sub>3</sub> dans le ciment peut raccourcir le temps nécessaire pour que le ciment commence à durcir. Cela peut être dû à plusieurs facteurs, notamment la réaction chimique entre le SO<sub>3</sub> et les composants du ciment, qui peut accélérer le durcissement. Cependant, une quantité excessive de SO<sub>3</sub> peut également causer des problèmes, tels que la fissuration prématurée du béton.

Il est important de contrôler la teneur en SO<sub>3</sub> dans les mélanges de ciment pour assurer un durcissement approprié et éviter les effets indésirables. L'interprétation précise de l'influence du SO<sub>3</sub> sur le début de prise peut dépendre de la formulation spécifique du ciment et des conditions de fabrication.

## Conclusion générale

Ce travail expérimental a étudié les avantages de substitution partielle du ciment par l'ajout (calcaire). Il consiste à préparer des mélanges de ciment en remplaçant un certain pourcentage de ciment [0%,5%, 10%,15% et 20%] par l'ajout calcaire et de suivre à chaque fois l'effet de cette substitution. Le but de l'expérience que nous avons vécue est de connaître l'importance des ajouts, et l'effet de calcaire sur les composés chimiques et les propriétés chimiques et physico-mécaniques

L'utilisation des ajouts cimentaire est la solution idéale à suivre pour assure la continuité de la fabrication de ciment, soit du côté écologique ou économique, car l'industrie cimentière consomme beaucoup d'énergie et elle a cote dans la pollution d'air en raison de l'émission de CO<sub>2</sub>.

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

- La chaux libre diminue avec l'augmentation de l'ajout calcaire.
- Le taux d'ajout influence sur la perte au feu ainsi la surface spécifique Blaine cela indique que il y'a une relation croissante entre l'ajout et les deux dernières.
- On peut conclure que l'ajout de calcaire jusqu'à 20% est bénéfique tant que la résistance à 28 jours reste dans le palier de classe du ciment (42,5MPa).
- Il y'a une relation croissante entre le débit de prise et le pourcentage de SO<sub>3</sub> plus que SO<sub>3</sub> augment plus le débit de prise augment.

Les résultats expérimentaux obtenus ont permis d'évaluer la qualité du ciment CEMII (CPJ) en fonction de la variation du taux d'ajout (calcaire). Cette étude met en évidence la dépendance entre la quantité ajoutée et les propriétés du ciment.

En effet, les analyses physico-chimiques et mécaniques du ciment ont montré que jusqu'à 10% de calcaire, les propriétés du ciment sont convenables selon les normes internationales.

La conclusion finale de l'étude montre que les ajouts naturels (calcaire) ne peuvent que contribuer à la production de nouveaux ciments économiques aux propriétés mécaniques.

## Références bibliographiques :

- [1] : DEBOUCHA.W, BELAGRAA.L, BOUZID.A, OUDJIT. M, l'effet des fillers de calcaire sur les propriétés physico-chimique du mortier à base de CRS, colloque international Francophone Nomad, Toulouse, France,2012.
- [2] : BOUBEKEUR.T, Evaluation des Performances Des Ciments Portland au Calcaire mémoire de magister, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef,2009.
- [3] : AICHATENE.Y, HACENE.M, NOURI.I, étude de conception d'un convoyeur bande, mémoire de master, université Saad Dahleb blida,2019/2020.
- [4] : MADANI.A, analyse du circuit de broyage cuit à la cimenterie de Meftah, mémoire de master, université Saad Dahleb Blida 2017/2018.
- [5] : BEKIRI.A, contribution à l'analyse des risques et à l'amélioration de la procédure d'identification et la hiérarchisation des mesures de contrôle, mémoire de master, université M'hamed bougara Boumerdes,2016/2017
- [6] : BOUREGAYA.S, Synthèse d'un ciment élitique à moindre impact environnemental à partir de vase de barrage et utilisant le sulfate de zinc comme minéralisateur, thèse de doctorat, université de TOULOUSE,2018.
- [7] : ELODIE.R, Etude des modes d'action d'agents de mouture sur le broyage du clinker, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne,2006
- [8] : DAHMANI.S, Effet de l'association laitier-calcaire sur les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques de ciments, mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila,2015/2016
- [9] : BOUGLADA.M, Caractérisation physico-chimique et microstructurale des ajouts minéraux, thèse de doctorat, Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd,2019.
- [10] : AMNA. A, Étude des propriétés physico-chimiques de nouveaux supports argileux modifiés par des liquides ioniques dans la perspective d'applications au traitement de déchets toxiques, thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne,2019.
- [11] : BOUALI.K, Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires, thèse de magister, université Boumerdes,2014.

- [12] : CHAABIA.R, Caractérisation physico-chimique et enrichissement des minerais de fer : cas du gisement d'Anini, Sétif-Algérie, thèse de doctorat, université Badji Mokhtar Annaba,2016.
- [13] : MEBARKI.H, Etude comparative des clinkers de l'ouest Algérien : Analyse Physico-chimique et Applications, mémoire de master, Université Tlemcen,2013.
- [14] : LAKHAL.R, Nouveau procédé d'élaboration de micro et nanoparticules d'oxyde de fer en voie sèche : caractérisation, étude du procédé et proposition d'un mécanisme réactionnel, thèse de doctorat, université de Toulouse,2016.
- [15] : OUKIL.S, Effet de la poudre de verre et du méta kaolin sur les propriétés des mortiers de chaux aériennes, mémoire de master, Université Badji Mokhtar – Annaba,2019.
- [16] : Mathieu Le Rouzic, Étude des propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux cimentaires à base d'oxyde de magnésium, thèse de doctorat, Université Paris-Est, France,2014
- [17] : ZERROUK.N, Détermination quantitative des constituants du ciment de quatre composants, mémoire de master, université Sidi Mohamed Ben Abdellah,2012.
- [18] : CHRISTOPHE.C, l'industrie du ciment données, article général, école mathématique,2008.
- [19] : BENAOUIRA.H, BOUHALI.N, Etude de l'influence des ajouts pouzzolaniques sur l'évolution de la propriété d'une matrice cimentaires, mémoire de master, université Mouhamed Boudiaf Msila,2016/2017.
- [20] : RABIAI.Y, étude de vérification de choix de concasseur dans une cimenterie mémoire de master, université Abderrahmen mira de Bejaia,2015/2016.
- [21] : BENAÏSSA.A, HASSINOUI.Y, Optimisation du Taux Des Incuits Dans le Ciment CEM II/A 42,5, mémoire de master, centre Universitaire BELHADJ BOUCHAÏB D'AÏN-TEMOUCHENT,2018.
- [22] : BOUNAB AYACHE.B, Automatisation du stockeur et le moteur four. Rapport de stage à ERCE et SCHB, Université de Paul Cézanne Aix Marseille 3.
- [23] : LAHCEN.L, calcule Raw mix design pour la fabrication d'un ciment blanc 52,5 N, mémoire de master, UNIVERSITE MOUHAMED KHIDER de BISKRA,2021/2022

- [24] : AZIZI.N, caractérisation des ciments algériens et leurs effets sur les performances du béton, thèse de magister, université Dr. YAHIA FARES de MEDEA,2011.
- [25] : ARIDJ.A, Impact de la minéralogie de clinker sur la broyabilité et les performances des broyeurs ciment, mémoire de master, université MOHAMED KHIDER DE BISKRA,2019/2020.
- [26] : BEN GUEDDOUR.A, Synthés et caractérisation de silicates de calcium hydratés (CSH) hybride, mémoire de master en génie des procédés,2013.
- [27] : MADOUY.Y, Recyclage d'un déchet industriel (poussière de By-pass), mémoire de master, université MOHAMED KHIDER DE BISKRA,2018/2019.
- [28] : HARBI.R, Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers avec additions minérales, thèse de doctorat, université 8 Mai 1945 Guelma,2018.
- [29] : AMOURI.C, contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité) thèse de doctorat, Université MENTOURI Constantine,2009.
- [30] : LALEM.F, Effet de l'ajout de la cendre issue de la combustion de déchets de palmiers dattiers à différentes du mortier de ciment, mémoire de master, Université KASDI Merbah de Ourgla,2019.
- [31] : GUETTAF.Y, Effet du climat chaud sur les performances des bétons autoplaçants à base de pouzzolane naturelle, thèse de doctorat, université SAAD Dahleb Blida, 2020.
- [32] : MISRAOUI.K, Etude de l'effet des mélanges ciment-fumée de silice sur la résistance mécanique des mortiers, mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou,2015/2016.
- [33] : BELBACHIR.N, Etude des propriétés mécaniques à court terme de béton à base de ciment pouzzolanique de synthèse, mémoire de magister, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem,2012.
- [34] : KORTEBI.A, BELALIA.A, Comparaison entre quelques ciments d'Algérie (Meftah, Beni Saf et Hadjar Soud), mémoire de master, Université des sciences et de terre de la technologie HOUARI BOUMEDIENE,2016/2017.

[35] : GHERMAOUI.A, 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 ABOU BEKR BELKAID – TELMCEN,2015.

## Annex

### L'influence de l'ajout de calcaire sur la perte au feu

Ajout (%)	0	5	10	15	20
PAF (%)	2,81	4,17	6,27	8,37	10,7

### L'influence d'ajout sur le refus

% D'ajout	0	5	10	15	20
Refus % Tamis 45µm	14,05	12,88	11,68	11,12	7,08

### L'influence de l'ajout de calcaire sur la surface spécifique

% d'ajout	0	5	10	15	20
SSB	3160	3338	3594	3647	3753

### L'influence de l'ajout de calcaire sur la résistance

	2 jours	28 jours
0%	22,90	57,90
5%	19,20	53,25
10%	19,10	50,50
15%	16,70	47,80
20%	15,60	43,60

### L'influence de SO<sub>3</sub> sur début de prise

DP (min)	186	189	191	195	197
SO <sub>3</sub>	2,24	2,26	2,28	2,31	2,35