

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSENGNEMENT SUPERIEUR  
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 ACADEMIQUE EN GENIE DES PROCEDES**

**Spécialité : Génie des matériaux**

Intitulé de mémoire

L'impact du laitier de haut fourneau sur les propriétés chimiques et physico-mécaniques du ciment

**Présenté par :**

- Chorfi Ouassila
- Benmihoub Wafaa Sara

**Encadré par :**

Pr. Bouchenafa.N

Promotion 2023

## **REMERCIEMENT**

D'abord nous remercions DIEU, le tout puissant qui nous a donné la force, le courage et la patience tout au long de la réalisation de ce modeste travail.

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au laboratoire de la cimenterie de MEFTAH. C'est avec un grand et profond respect que je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé et qui ont collaboré à la réalisation de ce mémoire de Master et plus particulièrement **MONSIEUR FARID TOUMI**, responsable de qualité a CIMENTRIE DE MEFTTAH GICA, qui a été notre maitre de stage et de nous avoir donner la chance d'effectuer ce stage au sein de l'unité et qui nous a accueilli.

Nous exprimons nos profonds remerciements au **PROFESSEUR BOUCHENAFI NAÏMA**, qui a encadré ce travail, pour sa disponibilité, sa patience, son soutien, ses conseils, sa rigueur scientifique, qu'elle a su nous communiquer pour mener au mieux ce travail de recherche.

**Aux membres de jury**, pour avoir accepté de lire et de juger ce mémoire, veuillez trouver ici expression de nos vifs remerciements.

# **Dédicace**

*Je dédie ce travail et nos profondes gratitude*

*A mes parents qui m'ont beaucoup aidé pour terminer mes études, et qui m'ont tellement encouragé moralement et psychiquement, et qui se sont sacrifiés pour moi, Spécialement à la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, mon bonheur, **Hayet** ma chère mère que J'adore.*

*A mes sœurs **Rania et Tesnime** qui ont toujours été là pour moi et dont le soutien inconditionnel et les encouragements ont été d'une grande aide.*

*Un spéciale dédicace à ma merveilleuse chérie **Imen** pour son accompagnement, son amour, son aide. Tu es quelqu'un de formidable imouty je te souhaite plus de succès.*

*A mes chers amis **Cham, Mohamed, Walid** pour leurs encouragements permanent et leurs soutiens moral.*

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, nous vous disons merci.*

**Chorfi Ouassila**

# ***Dédicace***

A celle qui m'a comblé d'affection, d'amour et de tendresse, et qui a veillé à côté de mon berceau pour apaiser mes cris de douleurs, et qui n'a cessé de le faire à jamais

♥Ma mère ♥

A celui qui est le plus audacieux des hommes, qui n'a cessé de me soutenir moralement et matériellement, m'ouvrant ses bras dans les sombres moments et m'aide à aller vers le mieux et vers le meilleur

♥Mon père ♥

A ma seule soeur et mon compagnon de ma vie

♥ Zineb ♥

A mes chères frères

♥Mohamed ,Ismail , Youcef ♥

A celle qui m'a donné toujours le soutien et le courage de poursuivre le chemin lors des moments de faiblesse

♥Ma chère copineManel♥

À mes deux chères grand-mere et à mon grand-père bien-aimé..

A ma famille :Benmihoub , Ghazel

À mes chères amis : Manar, Houda, Imen, Cham, Mohamed,...

Ce mémoire est le reflet de mes efforts, mais il est également le produit d'une multitude de personnes qui m'ont accompagné tout au long de ce voyage. C'est grâce à vous tous que j'ai pu atteindre cet objectif et je vous en suis profondément reconnaissant.

Que cette dédicace soit un témoignage sincère de ma gratitude et de mon appréciation envers chacun d'entre vous. Votre impact sur ma vie et ma carrière est inestimable.

Avec toute ma reconnaissance

**wafaa**

## ملخص :

يلعب الاسمنت دورا اساسيا كعامل رابط في العديد من تطبيقات البناء والهندسة. تبحث الاتجاهات في عالم اليوم عن مواد أكثر مقاومة وأكثر كفاءة بحيث تعد الإضافات الاسمنتية حاليًا من أحدث التطورات في إنتاج الأسمنت، حيث تعمل استخداماتها على تحسين الخصائص الميكانيكية للمواد الاسمنتية. وفي هذا السياق، أجريت هذه الدراسة التي تهدف إلى تطوير إسمنت جديد يعتمد على خبث فرن الانفجار، لهذا استخدمنا نسب مختلفة 20%، 25%، 30%، 40%، 50% . يكشف تحليل النتائج ان نسبة 20% تبرز على انها الافضل فيما يتعلق بالمقاومة الميكانيكية في اعمار مختلفة من التصلب (يومين، 7 ايام، 28 يوم)، على وجه الخصوص عند 28 يوم، لوحظت مقاومة ميكانيكية استثنائية تبلغ 42.9 ميغاباسكال، مما يدل على تفوق هذا المعدل في اداء الاسمنت. بناءا على هذه النتائج وجد ان كمية الخبث المضافة هي معامل يؤثر على الخواص الكيميائية و الفيزيائية الميكانيكية للاسمنت .

**الكلمات المفتاحية:** الاسمنت، خبث الفرن العالي، المقاومة الميكانيكية، إضافات الأسمنت، الكلنكر

## Résumé :

Le ciment joue un rôle essentiel en tant que liant dans de nombreuses applications de construction et d'ingénierie.

Les tendances du monde d'aujourd'hui est vers à la recherche de matériaux plus résistants et plus efficaces. De sorte que les ajouts cimentaires font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés mécaniques des matériaux cimentaires. C'est dans ce contexte que cette étude a été menée. Elle vise à développer un nouveau ciment à base de laitier de haut fourneau ; pour cela nous avons utilisé différentes proportions 20%, 25%, 30%, 40%, 50% .

L'analyse des résultats révèle que le taux de 20% se distingue comme étant le plus optimal en ce qui concerne la résistance mécanique à différents âges de durcissement (2 j, 7 j, 28 j). Particulièrement à 28 j, une résistance mécanique exceptionnelle de 42,9 MPa a été observée, démontrant ainsi la supériorité de ce taux dans les performances du ciment.

Sur la base de ces résultats, il a été constaté que la quantité de laitier ajoutée est un paramètre qui influence les propriétés chimiques et physico-mécaniques du ciment.

**Mots clés :** ciment, laitier de haut fourneau, résistance mécanique, Ajouts cimentaires, clinker

## Abstract :

Cement plays an essential role as a binder in many construction and engineering applications. Trends in today's world is looking for more resistant and more efficient materials. As a result, cementitious additions are currently among the most recent developments in cement production, as their uses improve the mechanical properties of cementitious materials. It is in this context that this study was conducted. It aims to develop a new cement based on blast furnace slag. In this context, this study was conducted with the aim of developing a new cement based on blast furnace slag, for this we used different percentages 20%, 25%, 30%, 40%, 50% .

The analysis of the results reveals that the 20% ratio stands out as the most optimal in terms of mechanical resistance at different ages of hardening (2 days, 7 days, 28 days). particularly, at 28 days, an exceptional mechanical resistance of 42.9 mPa was observed, demonstrating the superiority of this ratio in the cement's performance.

Based on these results, it was found that the quantity of slag added is a parameter that influences the chemical and physical-mechanical properties of the cement.

**Key words :** cement, blast furnace slag, mechanical resistance, Cement additions, clinker

# Table des Matière

**Résumé**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Introduction général**

## Chapitre I : Synthèse bibliographique

	<u>Page</u>
<b>I. Généralités sur ciment</b>	05
1. Historique	05
2. Définition	05
3. Constituants du ciment	06
3.1. Matières premières	06
3.2. Matières de corrections	07
3.3. Les matières secondaires	08
3.4. Produit semi fini (clinker)	09
4. Classification normalisée des ciments	10
5. Fabrication du ciment	11
5.1. Procèdes de fabrication	11
5.2. Technique de fabrication	12
5.3. Procédé de fabrication de l'unité	17
6. Principales caractéristiques	17
7. L'intérêt d'utilisation des additions minérales	19
8. Domaines d'emploi des ciments	20
<b>II. Laitier haut fourneau</b>	22
1. Définition	22
2. Origine	22
3. Différents types de laitier	23
3.1. Laitier (vitrifié)	23
3.2. Laitier cristallisé	23

4. Caractéristiques du laitier des hauts fourneaux	24
4.1. Composition chimique	24
4.2. Composition minéralogique	25
4.3. Caractéristiques physico-mécaniques	26
5. Utilisation des laitiers de haut fourneau	26
6. Comportement mécanique des ciments au laitier	27
6.1. Influence de la composition chimique	27
6.2. Influence de la porosité de la pâte du ciment	27
6.3. Influence de la finesse de mouture (surface spécifique)	28
6.4. Influence de la concentration de l'activant	28

## **Chapitre II : Matériels et Méthodes**

1. Matériaux utilisés	30
1.1. Laitier	30
1.2. Clinker	31
1.3. Gypse	32
1.4. Concassage du clinker	32
1.5. Broyage des matériaux	33
2. Analyses chimiques	33
2.1. Analyse par spectromètre de fluorescence X	33
2.2. Détermination de la perte au feu	35
2.3. Détermination de la chaux libre	36
3. Analyses Physico-mécaniques	38
3.1. Mesure des refus par tamisage ALPINE	38
3.2. Mesure de la surface spécifique par la méthode Blaine	39
3.3. Préparation des éprouvettes 4x4x16cm <sup>3</sup>	40
3.4. La résistance à la compression	42

## **Chapitre III : Résultats et discussion**

1. Caractérisation chimique des matériaux	45
1.1. Composition chimique des matériaux	45
1.2. Effet du taux de laitier sur la perte au feu	46

<b>1.3.</b> Effet du taux de laitier sur la chaux libre	46
<b>2.</b> Caractérisation physico-mécanique	48
<b>2.1.</b> Effet du taux de laitier sur les Refus	48
<b>2.2.</b> Effet du taux de laitier sur la surface spécifique de Blaine	49
<b>2.3.</b> Relation entre refus et SSB	50
<b>2.4.</b> La résistance mécanique	51
<b>Conclusion</b>	53
<b>Référence bibliographique</b>	55

# LISTE DES Figures

## Chapitre I

	<u>Page</u>
<b>Figure I.1</b> : Grains de calcaire	6
<b>Figure I.2</b> : Argile	7
<b>Figure I.3</b> : Sable	8
<b>Figure I.4</b> : Minerai de fer	8
<b>Figure I.5</b> : Gypse	9
<b>Figure I.6</b> : Les carrières de calcaire et d'argile de la Cimenterie	13
<b>Figure I.7</b> : Extraction des matières premières de leurs carrières	13
<b>Figure I.8</b> : Atelier de concassage	13
<b>Figure I.9</b> : Hall de pré-homogénéisation	14
<b>Figure I.10</b> : Broyeur cru	15
<b>Figure I.11</b> : Illustration du broyeur cru vertical	15
<b>Figure I.12</b> : Four rotatif	16
<b>Figure I.13</b> : Silo de clinker	17
<b>Figure I.14</b> : Broyeur du clinker	17
<b>Figure I.15</b> : Expédition en sacs	18
<b>Figure I.16</b> : Représentation schématique d'un haut fourneau	23
<b>Figure I.17</b> : LAITIER granulé	24
<b>Figure I.18</b> : Laitier cristallisé	25
<b>Figure I.19</b> : Schéma représentatif de l'élaboration du laitier	25

## Chapitre II

<b>Figure II.1</b> : Laitier poudre	30
<b>Figure II.2</b> : Clinker	31
<b>Figure II.3</b> : Un concasseur	33
<b>Figure II.4</b> : Broyeur a disque	33
<b>Figure II.5</b> : La pastilleuse	34
<b>Figure II.6</b> : La Spectroscopie à fluorescence X 'XRF'	35

<b>Figure II.7</b> : Lefour de calcination à 950°C	36
<b>Figure II.8</b> : La burette de filtre digital et la pompe de filtration	37
<b>Figure II.9</b> : L'appareil de refus par tamisage ALPINE	38
<b>Figure II.10</b> : Appareil de Blaine	40
<b>Figure II.11</b> : Principe de fonctionnement de Blaine	40
<b>Figure II.12</b> : Le moule d'éprouvette	42
<b>Figure II.13</b> : L'appareil à choc	42
<b>Figure II.14</b> : L'appareil de mesure la stabilité	43

### **Chapitre III**

<b>Figure III.1</b> : Variation de la PAF en fonction du pourcentage du laitier	46
<b>Figure III.2</b> : Variation de la chaux libre en fonction du pourcentage de l'ajout laitier	47
<b>Figure III.3</b> : Variation de pourcentage du refus en fonction pourcentage d'ajout	48
<b>Figure III.4</b> : Variation de la surface spécifique du Blaine en fonction du taux de laitier	49
<b>Figure III.5</b> : Variation des Refus et SSB en fonction du taux de laitier	50
<b>Figure III.6</b> : Effet de l'ajout laitier sur la résistance à la compression des mortiers	51

# LISTE DES TABLEAUX

## Chapitre I

	<u>Page</u>
<b>Tableau I.1</b> : Les cinq principales catégories de ciment	11
<b>Tableau I.2</b> : Domaine d'emploi des différents types des ciments	22
<b>Tableau I.3</b> : Variation de la composition chimique du laitier	26

## Chapitre II

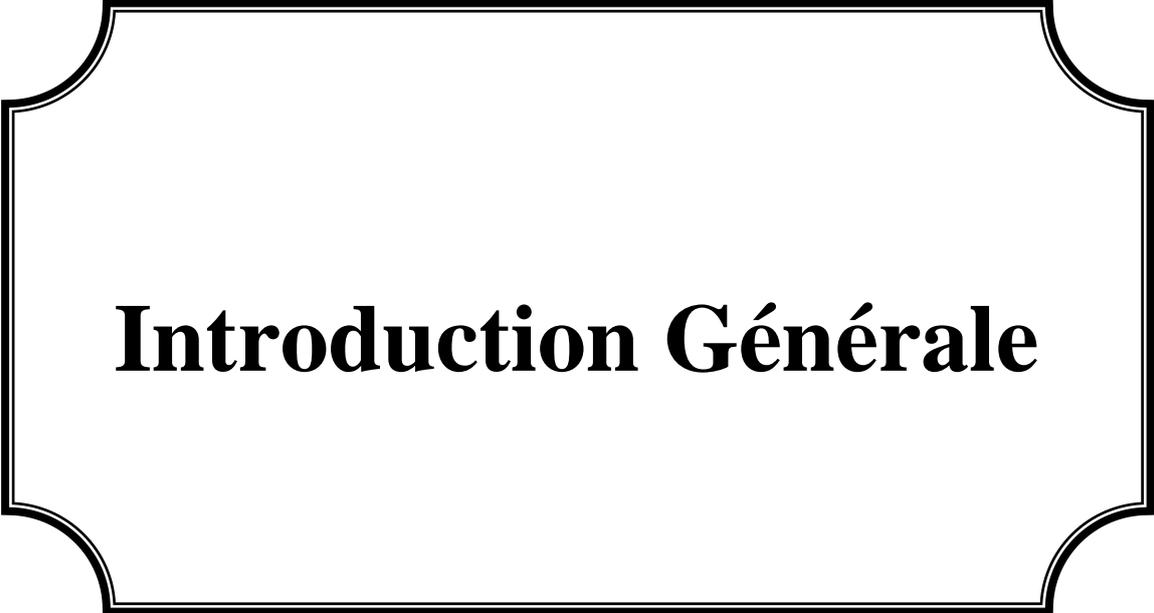
<b>Tableau II.1</b> : Composition chimique du laitier	30
<b>Tableau II.2</b> : Composition chimique du clinker	31
<b>Tableau II.3</b> : Composition minéralogique du clinker	31
<b>Tableau II.4</b> : Modules caractéristique du clinker	32
<b>Tableau II.5</b> : Composition chimique du gypse	32
<b>Tableau II.6</b> : Les résultats de la PAF des différents pourcentages de laitier	36
<b>Tableau II.7</b> : Résultats de % CaO des différents volumes $V_{HCl}$	37
<b>Tableau II.8</b> : Les résultats de CaO libre des différents pourcentages de laitier	38
<b>Tableau II.9</b> : Les Résultats de Refus des différents pourcentages du laitier	39
<b>Tableau II.10</b> : Les résultats de surface spécifique de Blaine des différents taux du Laitier	40
<b>Tableau II.11</b> : Composition de mortier	41
<b>Tableau II.12</b> : Les résultats de résistance des différents pourcentages du laitier	43

## Chapitre III

<b>Tableau III.1</b> : Les compositions chimiques du ciment au laitier	45
--	----

## Liste des abréviations

- (V): les cendres volantes siliceuses
- (W): les cendres volantes calciques
- C3S: silicate tricalcique (alite)
- C3A : Aluminates tricalciques (celite)
- C2S : silicate bi-calcique
- C4AF : ferro-aluminates tetra-calcique
- CEM I: ciment portland
- CEM II :ciment Portland composé
- CEM III :ciment du haut fourneau
- CEM IV: ciment pouzzolanique
- CEM V: ciment composé
- LSF :le facteur de saturation en chaux
- MS: module silicique
- AM: module alumino-ferrique
- SSB: surface spécifique de Blaine
- PAF: perte au feu



# **Introduction Générale**

# Introduction générale

L'industrie du ciment occupe une place prépondérante dans les économies de toutes les nations puisqu'elle est à la base du développement des secteurs vitaux dans l'économie des pays, par la production des matériaux les plus usités en particulier, les bétons. En termes d'énergie nécessaire à sa production, le ciment se classe en troisième rang de tous les matériaux, devancé seulement par l'acier et l'aluminium.

En Algérie, le besoin en ciment a fortement augmenté au cours des cinq dernières années conséquence du programme de relance économique et des grands travaux initiés (autoroute Est-Ouest, voie ferrée rapide, barrages, logements...). D'autre part, l'économie de marché mondiale astreint les industriels à rester toujours plus compétitifs pour la survie de leurs activités. Ceci implique en partie de développer des moyens de production performants et économiquement viables.[1]

Dans ce but l'utilisation des ajouts minéraux dans la production des ciments a résolu en grande partie le problème d'autosuffisance nationale, ainsi que celui de la baisse du coût énergétique. En faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciments avec les propriétés physico-mécaniques demandées. Les ajouts minéraux sont largement utilisés dans la production des ciments à travers le monde.

Le laitier de haut fourneau est l'un de ces sous-produits issus de l'industrie sidérurgique, il est utilisé comme ajout cimentaire depuis une centaine d'années. Le processus de granulation qui lui confère son caractère vitreux et ses propriétés de liant hydraulique résulte d'une longue démarche d'optimisation de la part des sidérurgistes pour permettre sa valorisation. En l'état actuel des conventions d'allocation de la charge en CO<sub>2</sub> des sous-produits industriels, les ciments au laitier ont une faible empreinte carbone. Ils présentent par ailleurs une grande durabilité et haute résistance aux attaques d'agents agressifs comme les chlorures et les sulfates, ce qui les rend particulièrement performants en milieu marin par exemple. La connaissance industrielle du laitier et les recherches effectuées sur ce matériau ont permis de mettre en évidence des paramètres liés à sa réactivité au milieu cimentaire, comme sa composition ou sa finesse de broyage [2]. Le laitier ne possède aucune vertu liante, mais sous la forme broyée et en présence d'eau, il réagit chimiquement avec la chaux et l'eau pour former les composés possédant des valeurs liantes.

L'objectif de notre étude est d'évaluer expérimentalement l'influence de taux d'ajout laitier (20%, 25%, 30%, 40%, 50%) sur les propriétés du ciment afin de pouvoir les améliorer pour obtenir un ciment au laitier (moins de clinker) avec des propriétés semblables ou meilleures que celle du ciment Portland ordinaire.

Ce travail est entamé par cette introduction générale qui donne une idée sur l'importance et l'intérêt du thème abordé, tout en soulignant les objectifs visés.

- **Chapitre I :** Constitué d'une revue bibliographique donnant une présentation générale sur le ciment, leur fabrication, composition et classification, puis nous avons présenté dans la deuxième partie de ce chapitre, plus de détail sur le laitier de haut fourneau.
- **Chapitre II :** Présente les caractéristiques des matériaux utilisés (clinker, laitier, gypse) et les méthodes d'essais réalisés sur les ciments préparés et les mortiers.
- **Chapitre III :** Contient l'interprétation des résultats des essais obtenus

Enfin, ce mémoire est clôturé par une conclusion générale qui rappelle les principaux résultats obtenus ainsi que les perspectives.

# **CHAPITRE I :**

## Partie théorique

## **Préambule**

Le ciment est l'un des matériaux de construction les plus essentiels et répandus dans le monde. Il joue un rôle fondamental dans la construction d'infrastructures, de bâtiments, de routes et de nombreux autres ouvrages. Outre les matières premières traditionnelles, l'industrie du ciment a développé différentes approches pour améliorer ses performances et réduire son impact environnemental. Le laitier haut fourneau est l'un de ces ajouts bénéfiques au ciment.

## **I. Généralités sur ciment :**

### **1. Historique :**

La construction préhistorique et du début de l'antiquité était soit associée à la boue, soit a été faite sans connectivité, comme les murs de la mer de la Grèce ou les murs incas. A Babylone, la brique est liée au bitume. Les Égyptiens utilisaient des pyramides, en particulier un plâtre grossier produit par la cuisson du plâtre pur (sulfate de calcium). Les Grecs ont été parmi les premiers constructeurs à utiliser la chaux obtenue par la cuisson du calcaire (carbonate de chaux). Les Romains ont beaucoup utilisé la chaux dans leur construction, mais ont amélioré cette association depuis le premier siècle avant JC en ajoutant Pouzzolane à la cendre volcanique active naturelle ou artificielle comme les briques en poudre. Ils ont donc un lien hydraulique appelé ciment romain, qui est en fait entre la chaux et le ciment réel. Cela a permis la construction de grandes structures hydrauliques, comme le Pont du Gard, ou des structures maritimes comme les ports. Aucun progrès n'a été réalisé dans les volumes au Moyen Age, dont les principales créations - cathédrales - condamnent leur succès notamment pour les progrès réalisés dans l'art de la taille et de l'assemblage des pierres.

C'est seulement au XVIIIe siècle, les procédés de cuisson s'améliorent, que des chaux hydrauliques, intermédiaires entre les chaux et les ciments, furent produits. En 1756 l'Anglais John Smeaton en mélangeant celles-ci avec des pouzzolanes, obtient un mortier aussi dur que la pierre de portland. Cette élaboration fut reprise par ses successeurs. Ainsi fut introduit progressivement dans le langage l'appellation de ciment portland. En 1817, le Français Louis Vicat découvre le principe chimique du ciment et formule les règles de fabrication du ciment hydraulique. Il est considéré comme l'inventeur du ciment moderne, mais il a publié son travail sans demander de brevet. En 1824, l'Anglais Joseph Aspdin fait breveter le ciment « Portland », obtenu par un procédé de calcination associant calcaire et argile dans un four à charbon. Le nom "Portland", simplement dû à la similitude de couleur et de dureté avec la pierre de Portland (sud de l'Angleterre), est encore utilisé dans l'industrie aujourd'hui.[1]

## 2. Définition :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une poudre minérale très fine qui durcit sous l'action de l'eau, forme une pâte qui fait prise par suite des réactions et processus d'hydratation et qui après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.[2]

Il existe deux grandes familles de ciment :

- Les ciments Portland, qui sont actuellement les ciments les plus utilisés dans le monde, constitués majoritairement de silice ( $\text{SiO}_2$ ) et de chaux ( $\text{CaO}$ ).
- Les ciments alumineux qui se composent essentiellement d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et de chaux ( $\text{CaO}$ ).[3]

## 3. Constituants du ciment :

### 3.1. Matières premières :

#### 3.1.1. Calcaire

Le calcaire est généralement extrait de la carrière, il peut rentrer dans des proportions allant jusqu'à 75 % de la masse totale du mélange cru

Les calcaires peuvent être de pureté et de duretés variables, ils proviennent du dépôt de  $\text{CaCO}_3$  contenu dans les eaux de mer ou des lacs, dépôts provoqués par précipitation chimique ou réalisés par l'intermédiaire d'organismes vivants (mollusques, algues).

Certains de ces dépôts soumis à une pression et à une température suffisante, ont donné des calcaires cristallins.[4]



**Figure I.1 :** Grains de calcaire

#### 3.1.2. Argiles :

Les argiles sont constituées essentiellement de silice, d'alumine et de fer et constituent par là même le complément indispensable du calcaire. Elles peuvent être classées de plusieurs manières.

On distingue ainsi :

- Les argiles résiduelles provenant de la décomposition sur place de roches existantes, du fait d'agents physico-chimiques.
- Les argiles transportées et déposées sous l'effet des mers, des cours d'eau, des glaciers, du vent.

Les argiles utilisées en cimenterie sont des argiles communes qui peuvent être constituées par des mélanges des groupes énumérés. De plus les argiles résiduelles contiennent souvent des fragments des roches qui leur ont donné naissance et qui risquent de les rendre impropres à la fabrication du ciment (silex, quartz, sous forme de nodules, de sable,...etc.)

Les impuretés telles que magnésie, soufre, soude, potasse, doivent être en quantité très limitée. D'une manière générale, le coût de la préparation des matières premières croît avec le nombre de constituants à mélange.[5]



**Figure I.2 : Argile**

### **3.2. Matières de corrections :**

#### **3.2.1. Sable :**

Le sable est fait de grains minéraux tous petits (pas plus de deux millimètres). C'est de la roche effritée par l'érosion.

Il 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.3 :** Sable

### **3.2.2. Minerai de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) :**

Le minerai de fer est une roche contenant du fer, généralement sous la forme d'oxydes. 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.[7]



**Figure I.4 :** Minerai de fer

### **3.2.3. Gypse :**

Le gypse est un minerai que l'on trouve dans la nature, c'est une substance blanche utilisée dans le ciment Portland pour retarder suffisamment la prise et assurer ainsi la mise en place du mortier ou du béton.

Il est un minéral composé de sulfate hydrate de calcium sous forme de formules chimiques  $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$  ou  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2(\text{H}_2\text{O})$  ainsi qu'une roche évaporitique.[8]



**Figure I.5 :** Gypse

### **3.3. Les matières secondaires : Ajouts**

#### **3.3.1. Pouzzolane :**

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ce sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes.[9]

#### **3.3.2. Calcaire :**

Sont obtenus après un broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) supérieure à 75%. Ces additions ne participent pas à la création de résistances mécaniques du ciment durci.[10]

#### **3.3.3. Les cendres volantes :**

Elles contiennent principalement de la chaux réactive ( $\text{CaO}$ ), de la silice réactive ( $\text{SiO}_2$ ) et de l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Elles sont les produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques. On distingue :

- a. Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques.
- b. Les cendres volantes calciques (W) qui ont des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques.[10]

#### **3.3.4. Fumées de silice :**

Les fumées de silice sont un sous-produit de la fabrication du silicium ou de différents alliages de Ferro silicium. Les fumées de silice sont produites lors de la réduction d'un quartz très pur par du charbon dans un four à arc, à la température de  $2000^\circ\text{C}$ .

La fumée de silice est une poussière très fine d'un diamètre moyen d'environ  $0,1 \mu\text{m}$  avec un effet fortement pouzzolanique, En outre, en raison de leur finesse, elles complètent la granulométrie des

ciments. Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécanique du fait de la réaction pouzzolanique des fumés de silice.[11]

### **3.3.5. Schistes calcinés :**

Ces produits, obtenus à une température d'environ 800 °C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques.[12]

### **3.3.6. Laitier de haut fourneau :**

Les laitiers des hauts fourneaux sont des sous-produits formés lors de l'élaboration de la fonte à partir de minerai de fer, ayant des propriétés hydrauliques.

Le laitier se compose principalement de silice ( $\text{SiO}_2$ ), chaux ( $\text{CaO}$ ), alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et d'oxyde de magnésium ( $\text{MgO}$ ).[12]

### **3.4. Produit semi fini (clinker) :**

Le clinker est un mélange de calcaire  $\text{CaCO}_3$ (~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. Ces nodules comportent quatre phases cristallines synthétisées lors de la cuisson par notation cimentière :

- Silicate tricalcique également dénommé (alite),  $\text{C}_3\text{S}$  dont la formule chimique est  $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$
- Silicate bi-calcique ou (bélite),  $\text{C}_2\text{S}$ , de formule chimique est  $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$
- Aluminates tricalciques ou (célite)  $\text{C}_3\text{A}$ , de formule chimique est  $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$
- Ferro-aluminates tétra-calcique  $\text{C}_4\text{AF}$ , de formule chimique est  $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ . [13]

## **4. Classification normalisée des ciments :**

Les principales catégories de ciment conformément à la norme SIA 215.002 sont résumées dans le tableau ci-dessous

**Tableau I.1 : Les cinq principales catégories de ciment[14]**

Type de ciment	Désignation	Pourcentage De clinker (% du poids)	Composants Principaux (% en poids)	Nature	Composants secondaires(% en poids)
CEM I	Ciment Portland	95-100	0	-	0-5
CEMII	Ciment Portland composé	65-94	6-35	Calcaire(L), Laitier granulé(S), fumées de silice(D,max. 10 %), pouzzolanes (P,Q), cendres volantes(V,W) ou schist carbonisé(T)	0-5
CEM III	Ciment de haut-fourneau	5-64	36-95	Laitier granulé	0-5
CEM IV	Ciment pouzzolanique	45-89	11-55	Pouzzolanes, cendres volantes	0-5
CEMV	Ciment composé	20-64	36-80	Laitier granulé et pouzzolanes et/ou cendres volantes	0-5

## 5. Fabrication du ciment :

### 5.1.Procèdes de fabrication :

Il y a 4 méthodes de fabrication dans l'industrie du ciment

#### A. Procédé par voie humide (ancien)

Cette méthode est utilisée depuis longtemps, la plus simple mais la plus exigeante énergie. Dans ce processus, le calcaire et l'argile sont finement broyés et mélangés avec L'eau forme une pâte assez liquide (environ 42% d'eau). Nous brassons Cette pâte est énergiquement versée dans des grands jarres d'un diamètre de 8 à 10 mètres. Elle est Constamment malaxée et homogénéisée, ce mélange est appelé le cru.

Les produits chimiques peuvent être analysés avant la cuisson et des corrections apportées si nécessaire. La pâte est ensuite envoyée à l'entrée du four rotatif. Le clinker, à la sortie du four, la trempe est effectuée à travers un refroidisseur. Quelle que soit la méthode de fabrication utilisée, à la sortie du four, on obtient le même Clinker qui est encore chaud.[14]

#### **B. Procédé par voie semi-humide**

Dans le procédé semi-humide, la pâte est d'abord déshydratée dans un filtre-presse, puis le gâteau de presse est extrudé en granulés et envoyé vers un préchauffeur à grille ou directement vers un sécheur pour la production de farine crue.[15]

#### **C. Procédé par voie semi-sèche**

Dans la méthode semi-sèche, la farine est mélangée à de l'eau pour former des granulés, Introduit dans un préchauffeur à grille en début du four ou un four long équipé de croisillons.[15]

#### **D. Procédé par voie sèche (plus utilisé)**

Les matières premières broyées et séchées passent d'abord par le préchauffeur à cyclone avec ou sans pré-calciateur (types AT "air-through" ou AS "air-separation"), puis dans le four 80 m tubulaire. Il s'agit du processus le plus récent et le plus étendu puisqu'il est moins énergivore, mais nécessite la mise en place de moyens de captage importants Poussière (filtres électriques, filtres cyclones et multi-cyclones, dépoussiéreurs électrostatique...).[16]

### **5.2. Technique de fabrication :**

#### **5.2.1.Extraction :**

Les matières premières sont extraites à partir de parois rocheuses de carrières à ciel ouvert, de carrières de calcaire et d'argile situées respectivement à 1 km et 4 km de la cimenterie. L'extraction de ces matières premières (Figure I.6) se fait par dynamitage. Pour produire un ciment de qualité constante, les matières premières doivent être prélevées, dosées et mélangées très soigneusement pour obtenir une composition parfaitement régulière.[17]



**Figure I.6 :** Les carrières de calcaire et d'argile de la Cimenterie



**Figure I.7:** Extraction des matières premières de leurs carrières.

### **5.2.2. Concassage :**

Les pierres sont généralement transportées à l'usine en gros morceaux, et avec l'humidité sont extraites de carrières, ils doivent d'abord être broyés puis séchés, ou au contraire délayer avant d'être passés au broyeur. La figure **I.8** nous montre l'atelier de concassage.[18]



**Figure I.8:** Atelier de concassage

### 5.2.3. Pré-homogénéisation :

La matière première est répartie en couches horizontales successives, qui forment finalement une pile dont la composition générale est celle souhaitée. Les couches sont alors prise verticalement, ce qui signifie qu'un matériaux de même composition peut être échantillonné de façon continue. La figure I.9 nous montre le hall de pré-homogénéisation.



**Figure I.9:** Hall de pré-homogénéisation

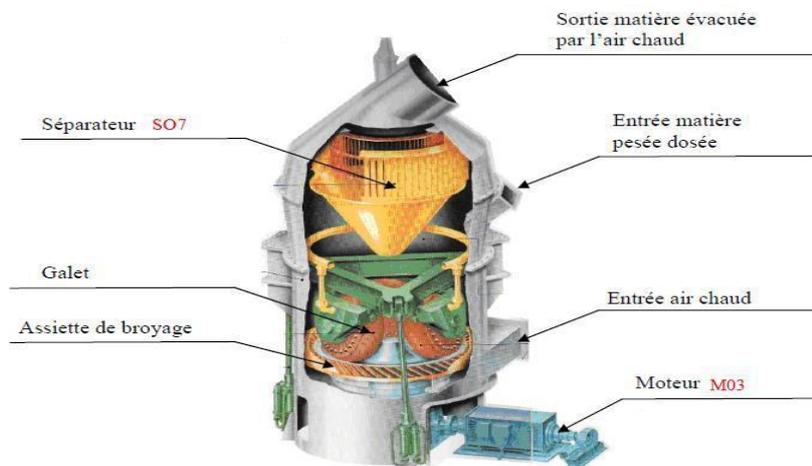
La matière première est prise dans les tas de pré homogénéisation par les roues de pelle. La pré homogénéisation de la matière première est effectuée en utilisant un bras de râteau, tournant autour d'un axe dans un hall.[19]

### 5.2.4. Broyage du cru :

Le broyage a pour objet de transformer des particules grossières en poudre. Après la détermination du contenu des divers composants, les trémies de dosage envoient le mélange obtenu dans le concasseur vertical à travers une courroie de transport. Farine, dont le principe de production (broyage) voire la figure I.10).[20]



**Figure I.10:** Broyeur cru



**Figure I.11:** illustration du broyeur cru vertical

**5.2.5. Filtration (Séparation Gaz-matière) :**

Avant le stockage traversant quatre cyclones pour séparer la matière crue du gaz et de la poussière.

**5.2.6. Stockage et Homogénéisation :**

Dans le silo, il existe deux types de processus, qui constituent un bon mélange de matière première et de stockage.

**5.2.7. 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.[21]

### 5.2.8. Four rotatif :

Une fois la matière première prête, elle est acheminée directement à l'entrée du four, qui consiste généralement en un grand cylindre d'environ 3 à 6 mètres de diamètre et de 50 à 150 mètres de long, incliné de 3 à 5 degrés par rapport à l'horizontale. Pour permettre une rotation du matériau autour de son axe en diminuant progressivement. La partie inférieure du four est Equipé d'une flamme qui maintient une température d'environ 1450°C, à l'approche de cette zone, la matière première subit une transformation continue pour former le produit fini le clinker.[22]

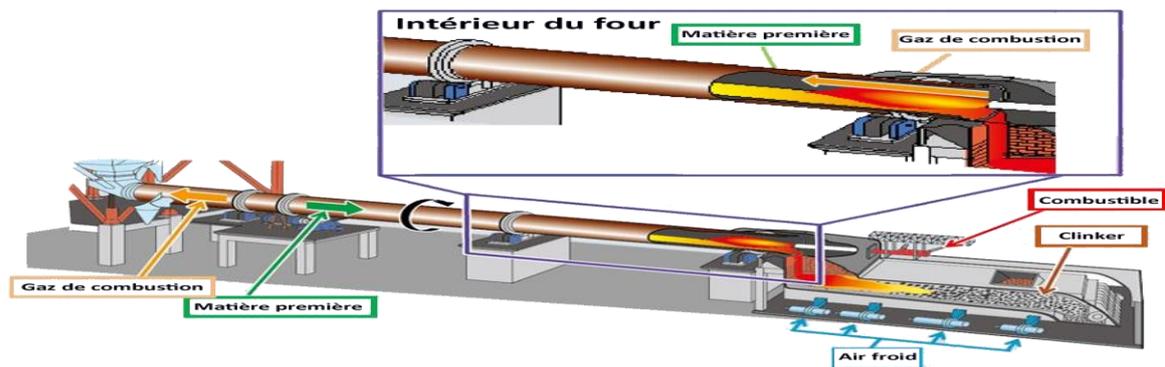


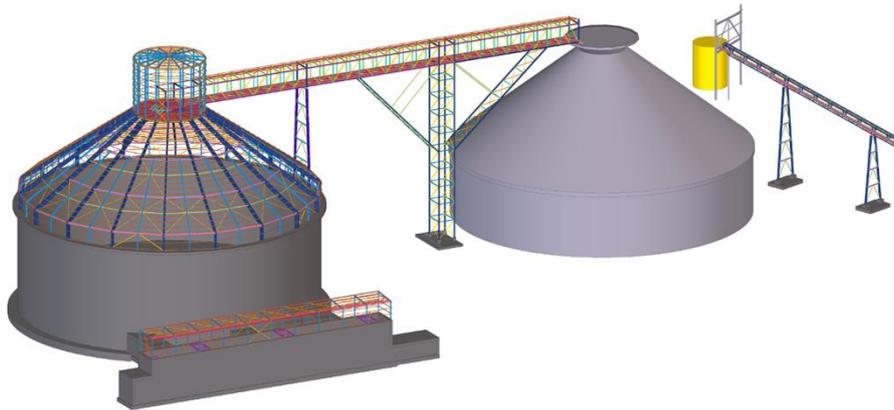
Figure I.12 : Four rotatif

### 5.2.9. Refroidisseur :

Quand il sort du four, le clinker tombe sur une grille de refroidissement rapide dans laquelle il est soufflé à l'air froid (le durcissement). Le refroidissement après cuisson joue un rôle important en ce qui concerne la forme et la réactivité des composants du clinker.[23]

### 5.2.10. Stockage du clinker :

Après refroidissement, clinker se présente sous la forme de grandes pierres et est dirigé vers le silo par moquette métallique pour stocker le clinker. Selon la figure I.13



**Figure I.13:** Silo de clinker

### **5.2.11. Broyage du clinker**

Les clinkers avec le gypse ajouté (retardateur de prise) et éventuellement les additions (calcaire, pouzzolane...) sont rectifiées pour obtenir les particules plus fines. Les méthodes de concassage utilisées dans les cimenteries sont adaptées à la nature dure et abrasive du clinker.[17]



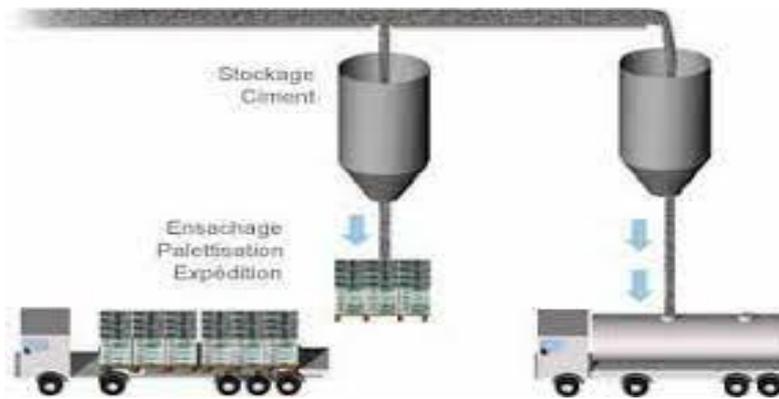
**Figure I.14:** Broyeur du clinker

### **5.2.12. Stockage du ciment :**

Après le concassage du clinker, le gypse et les additions on dirige le produit fini vers le silo de stockage.

### **5.2.13. Ensachage et expédition :**

Le produit est mis en vente en sachets et en vrac de deux façons.



**Figure I.15 :** Expédition en sacs

### 5.3. Procédé de fabrication de l'unité SCMI : [24]

Le procédé de fabrication du ciment par voie sèche est actuellement la méthode de production de ciment la plus moderne et la plus efficace. Sous l'action de grandes quantités d'énergie, la fabrication du ciment portland par voie sèche va passer par différentes étapes de transformation physico-chimique. Elle se déroule en deux étapes principales :

- la production d'un semi-produit appelé clinker est obtenu par cuisson de matières premières (calcaire, argile, oxyde d'aluminium et oxyde de fer) préalablement broyées finement et mélangées dans des proportions définies.
- Fabrication du ciment par co-broyage du clinker avec du gypse (régulateur de prise) et d'éventuels ajouts minéraux.

Plusieurs types de ciment sont fabriqués. Ciment « Portland CEMI » (ciment pur sans additifs, composé de clinker et de gypse) et ciment « Portland Composite CEMII » (ciment avec additifs ajoutés).

## 6. Principales caractéristiques :

Le ciment se caractérise par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle, soit sur la poudre, soit sur la pâte, soit sur le « mortier normal » (mélange normalisé de ciment, de sable et d'eau défini par la norme NF EN 196-1).

**6.1. 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  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2800 et 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

**6.2. La masse volumique apparente :** représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments inclus). Elle est de l'ordre de  $1000 \text{ kg/m}^3$  en moyenne pour un ciment.

**6.3. La masse volumique absolue :** représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments exclus). Elle varie de  $2\ 900$  à  $3\ 150 \text{ kg/m}^3$  suivant le type de ciment.

**6.4. Le début de prise :** est déterminé par l'instant où l'aiguille de Vicat – aiguille de  $1 \text{ mm}^2$  de section pesant  $300 \text{ g}$  – ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment. Les modalités de l'essai font l'objet de la norme NF EN 196-3. Suivant les types de ciment, le temps de début de prise doit être supérieur à 45 minutes ou à 1 heure.

**6.5. L'expansion :** se mesure suivant un essai normalisé (norme NF EN 196-3) et grâce aux aiguilles de Le Chatelier. Il permet de s'assurer de la stabilité du ciment. L'expansion ne doit pas être supérieure à  $10 \text{ mm}$  sur pâte pure pour tous les ciments (conformément à la norme NF EN 197-1).

**6.6. Les résistances mécaniques :** mesurées sur éprouvettes de mortier normal, caractérisent de façon conventionnelle la résistance du ciment définie par sa valeur nominale. Cette valeur est la limite inférieure de résistance en compression à 28 jours.

**6.7. Retrait (NF P15-301) :** Le retrait est la variation (diminution) des dimensions de l'élément (pâte, mortier ou béton) au cours de l'hydratation de son ciment. Il se produit lorsque cet élément est mis dans une atmosphère ayant une humidité relative inférieure à celle d'équilibre de l'élément. Généralement, le retrait est mesuré à partir de la variation de longueur sur des éprouvettes prismatiques de mortier normalisé (NF 196-1)  $4*4*16 \text{ cm}^3$  conservées dans l'air à une température de  $20 \text{ °C}$  et une hygrométrie de  $(50\pm 5) \%$ . Pour un ciment Portland ordinaire CEM I 42.5, la norme NF P15-301 impose un retrait maximal de  $1000 \text{ }\mu\text{m/m}$ .

**6.8. Durcissement :** L'une des principales caractéristiques du ciment est le durcissement, c'est-à-dire l'acquisition d'une résistance progressive avec le temps. Le durcissement est dû principalement à l'avancement d'hydratation mais les deux phénomènes n'ont pas la même évolution avec le temps. L'hydratation du ciment continue pendant des mois voire des années, alors que le durcissement de la matrice cimentaire se poursuit dès les premières heures.

**6.9. Gonflement :** Contrairement au retrait, si l'élément (pâte, mortier ou béton) se trouve dans une atmosphère à humidité relative supérieure à celle d'équilibre de l'élément, les

dimensions de ce dernier augmentent, c'est le gonflement. Bien que cet essai n'ait pas normalisé, le gonflement est mesuré de la même façon que le retrait mais cette fois-ci les éprouvettes de mortier sont conservées dans l'eau à une température de 20 °C. [25]

## 7. L'intérêt d'utilisation des additions minérales :

Les additions minérales sont devenues le moyen couramment utilisé dans le but de réduire l'impact environnemental de la fabrication du ciment. Elles permettent de minimiser l'émission de CO<sub>2</sub>, de réduire la consommation d'énergie et de ressources naturelles, mais aussi d'améliorer certaines performances des matériaux cimentaires notamment : rhéologie, résistance mécanique, durabilité,...etc. L'utilisation des additions minérales dans l'industrie cimentaire et les méthodes permettant d'améliorer certaines performances des ciments résultants, présentent aujourd'hui des axes de recherches à grande importance pour les fabricants de ciment mais aussi pour beaucoup de chercheurs à travers le monde. Les recherches menées sur les additions minérales jusqu'à présent ont permis d'exploiter, en plus des matériaux naturels traditionnels (tuf, calcaire, sable de dune, pouzzolanes naturelles,...), plusieurs types de déchets et de sous-produits. On peut citer par exemple: le laitier des hauts fourneaux, la fumée de silice, les cendres volantes, les déchets de verre, les boues de l'industrie papetière, la boue de dragage des barrages, la boue de curage des ouvrages de traitement des eaux, les sédiments marins, les déchets de brique, de carrelage et de marbre, les déchets végétaux et animaux, ...etc. Sur le plan industriel, les gouvernements de beaucoup de pays, en particulier les pays européens, préconisent d'éviter l'utilisation de clinker en grande proportions dans le ciment, et par conséquent ils favorisent fortement la commercialisation et l'utilisation des ciments mélangés à base de clinker et d'autres constituants (additions minérales), on parle souvent des ciments CEM II, CEM III, CEM IV et CEM V. Cette pratique peut garantir des avantages d'ordre :

- **Écologique et environnemental** : l'utilisation de moins de clinker entraîne une diminution du CO<sub>2</sub> produit d'une part. La réutilisation des déchets et la valorisation des sous-produits en tant qu'addition minérale dans l'industrie minérale présente une solution pour se débarrasser de ces déchets et ces sous-produits est un avantage environnemental d'autre part.
- **Économique** : car beaucoup d'additions minérales sont des sous-produits ou des déchets, donc leurs coût est très faible d'un côté, et ne nécessitent pas de cuisson d'autre côté, ce qui aide à baisser le coût de fabrication de ciment.
- **Technique** : les recherches ont montré que la plupart des additions minérales peuvent conduire à l'amélioration des performances du ciment. [25]

L'effet des additions minérales peut se manifester selon deux mécanismes d'action. Elles peuvent intervenir physiquement via leur finesse qui est généralement plus importante que celle du ciment Portland. Cette propriété permet aux additions minérales de densifier la pâte de ciment en conduisant à

un empilement plus compact des grains solides. Le deuxième mécanisme d'action est d'ordre chimique et est réservé aux seules additions minérales dites actives (matériaux ayant une activité pouzzolanique ou hydraulique). Les additions actives peuvent participer aux processus d'hydratation et modifier le résultat final de cette hydratation.

## **8. Domaines d'emploi des ciments :**

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.

Les domaines d'emploi qui découlent de ces propriétés précises pour chaque type sont données dans le tableau ci-dessous :

**Tableau I.2 : Domaine d'emploi des différents types des ciments [26]**

Type du ciment	Domaine d'emploi
<p>A. <u>Ciments courants</u> :</p> <p>CEM I</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Béton armé en général coulé sur place ou préfabriqué.</li> <li>• Béton précontraint.</li> <li>• Décoffrage rapide, mise en service rapide (de préférence classe R).</li> <li>• Bétonnage jusqu'à température extérieure entre 5 et 10°C.</li> <li>• Béton étuvé ou auto-étuvé.</li> </ul>
<p>CEM II / A ou B</p> <p>Ces ciments sont les plus couramment utilisés</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Béton en élévation, armé ou non, d'ouvrages courants.</li> <li>• CEMII/ A ou B classe R: travaux nécessitant une résistance initiale élevée (décoffrage rapide par exemple).</li> <li>• Fondations ou travaux souterrains en milieux non agressifs.</li> <li>• Dallages, sols industriels.</li> <li>• Maçonneries.</li> <li>• Stabilisation des sols.</li> </ul>
<p>CEM III / A, B ou C</p> <p>CEMV/ A ou B</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Travaux souterrains en milieux agressifs (terrains gypseux, eaux d'égouts, eaux industrielles, etc.).</li> <li>• Ouvrages en milieux sulfatés: les ciments produits sont tous ES, ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates, en conformité à la norme NF P 15-319.</li> <li>• Travaux à la mer; les ciments produits sont tous PM, ciments pour travaux à la mer, en conformité à la norme NF P 15-317.</li> <li>• Travaux en béton armé ou non, hydrauliques et souterrains (fondation) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Travaux nécessitant une faible chaleur d'hydratation.</li> <li>• Stabilisation des sols.</li> </ul> </li> </ul>
<p>B. <u>Autres ciments usage spécifique</u> :</p> <p>Le ciment alumineux fondu</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ouvrages exigeant une résistance élevée à court terme.</li> <li>• Bétonnage par temps froid (jusqu'à - 10°C pour des bétons massifs).</li> <li>• Pour béton devant subir des chocs thermiques ou une forte abrasion (utilisation de granulats synthétiques aluminocalciques).</li> <li>• Pour béton devant résister à des températures jusqu'à 1250°C.</li> <li>• Travaux à la mer.</li> <li>• Travaux en milieu très fortement agressif A4* (pH &lt;4) – milieu industriel et égouts urbains et ouvrages d'assainissement.</li> </ul>
<p>Le ciment prompt nature</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ouvrages nécessitant une prise très rapide: scellements courants, blocages, aveuglements, voies d'eau, calfatages.</li> <li>• Enduits, moulages, tableaux, arêtes, repères, charges importantes.</li> </ul>

## II. Laitier haut fourneau

### 1. Définition :

Le laitier est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques et est formé de constituants non ferreux, des fondants et des cendres de coke. Le laitier en fusion flotte sur la fonte en fusion et est granulé au cours d'un refroidissement rapide par trempé dans l'eau ou par un procédé de pelletisation, pour produire un matériau vitreux s'apparentant à du sable et qui est caractérisé par une réactivité hydraulique. Il est ensuite broyé pour former du laitier de haut fourneau (LHF), également appelé ciment de laitier, ou est utilisé dans la fabrication de ciments composés. En présence d'eau et d'un activateur, l'hydroxyde alcalin (du NaOH ou du KOH) ou  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , fourni par le ciment Portland, le laitier broyé s'hydrate et prend de la même manière que le ciment Portland, pour fournir une pâte plus dense, plus résistante et moins perméable que celle produite par la seule utilisation du ciment Portland. Le laitier présente des propriétés tant pouzzolaniques qu'hydrauliques.[27]

### 2. Origine :

Le haut-fourneau est un réacteur à lit consommable à contre-courant. Les deux réactions principales qui s'y déroulent sont des réactions de réduction des oxydes et d'échange entre le métal et le laitier. On introduit par le gueulard alternativement du coke, du minerai et du fondant, qui sont les matières premières utilisées pour l'élaboration de la fonte. On peut signaler que la fonte en fusion contient les éléments suivants : Fe, C, Si, Mn, P, S...et que le laitier en fusion en bas du haut-fourneau contient les éléments  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , MnO, CaO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ... .[28]

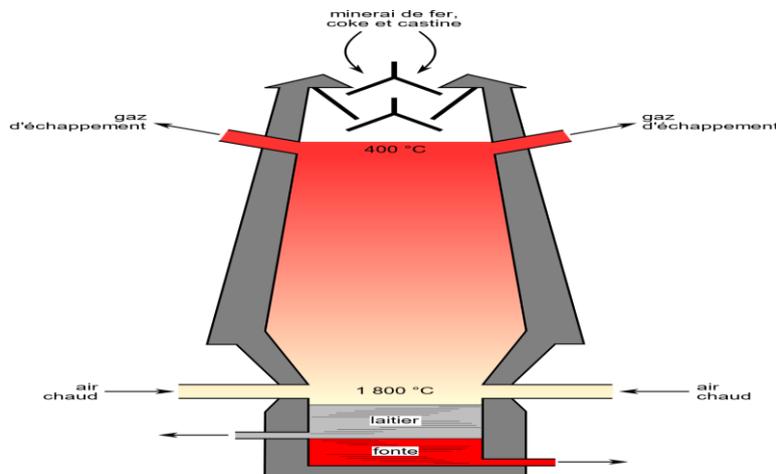


Figure I.16: Représentation schématique d'un haut fourneau

### 3. Différents types de laitier :

L'élaboration du laitier peut conduire selon le traitement de refroidissement adopté, à deux formes minéralogiques :

#### 3.1.Laitier (vitrifié) :

- **Laitier granulé :**

Il est produit grâce à la projection d'eau sous pression dans le laitier en fusion dès sa sortie du haut fourneau, en aboutissant à un sable fin et homogène. Ce refroidissement brutal a pour but d'éviter la recristallisation du matériau qui présente déjà une structure désordonnée et plus ou moins amorphe sous l'action de la fusion. De ce fait, le laitier vitrifié présente une structure vitreuse, riche en énergie ce qui lui confère une hydraulité latente pour son utilisation comme substitut du ciment portland.



**Figure I.17:** laitier granulé

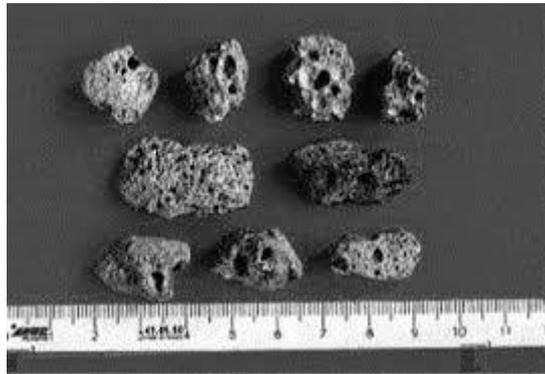
- **Laitier bouleté :**

Le bouletage consiste à refroidir le laitier dans des conditions telles qu'il se forme des boulettes quasi sphériques, dont l'intérieur est creux. Le laitier liquide se déverse dans un tambour tournant cannelé à axe horizontal qui comporte des trous en périphérie, alimenté en eau sous pression. Des rampes d'arrosage extérieur complètent ce dispositif. Les particules sont projetées à plusieurs mètres du tambour, et d'autant plus loin qu'elles sont plus grosses.[29]

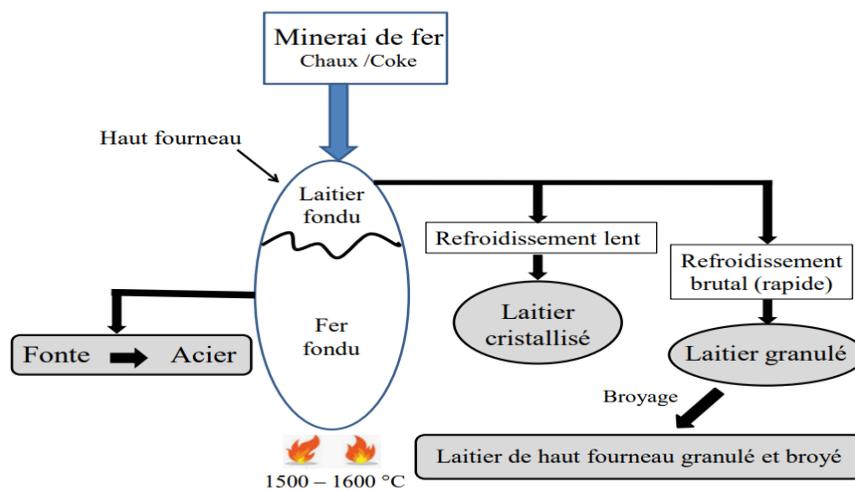
#### 3.2.Laitier cristallisé :

Un refroidissement lent est nécessaire c'est-à-dire par aspersion d'eau du laitier en fusion coulé à terre. Le laitier en fusion séparé de la fonte coule dans une rigole vers la fosse où il va se refroidir naturellement et se solidifier en cristallisant. Après solidification de la surface, le refroidissement est activé par un arrosage qui accélère la progression du front de solidification

et fragmente par choc thermique le laitier qui vient de se solidifier. Le laitier cristallisé, chimiquement stable et son pouvoir hydraulique, lorsqu'il existe, n'est que modeste.[30]



**FigureI.18:** laitier cristallisé



**FigureI.19 :** Schéma représentatif de l'élaboration du laitier

## 4. Caractéristiques du laitier des hauts fourneaux :

### 4.1.Composition chimique :

Les laitiers sont des silico-aluminates de calcium et de magnésium, ils sont constitués principalement (> 90 %) de quatre oxydes ( $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO}$ ). Ils contiennent également des petites quantités des oxydes ( $\text{TiO}_2 - \text{MnO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Cette composition dépend de plusieurs facteurs ; elle varie suivant la nature du minéral, du métal à obtenir, le combustible utilisé et les conditions de refroidissement.

Cette composition chimique est susceptible de se changer au cours des années selon le type du minéral, avec l'épuisement des sources. Ces variations affectent directement les quatre

majeurs constituants (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO) puis les composés en petites quantités (souffre et MnO et FeO).

Dans le procédé de fabrication la majeure partie des oxydes de fer passe dans la fonte avec une quantité du combustible (coke) tandis que les autres éléments : (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO) se combinent pour former le laitier du haut fourneau.[31]

**Tableau I.3** : Variation de la composition chimique du laitier

Elément chimique	Pourcentage [%]
CaO	30 à 50
SiO <sub>2</sub>	28 à 38
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8 à 24
MgO	1 à 18
SO <sub>3</sub>	1 à 2,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 à 3
MnO	1 à 3

#### **4.2.Composition minéralogique :**

Le laitier granulé est un verre (la teneur en verre dépasse 90 %), il est considéré comme un liquide rapidement refroidi. La rapidité du refroidissement est une caractéristique des silicates fondus pour acquérir la forme des verres. Le passage de l'état liquide à l'état solide est accompagné par un arrangement des molécules, qui prennent une orientation bien définie dans les cristaux. La poudre du laitier granulé examinée au microscope présente des grains transparents clairs isotopiques désignant le verre et une zone noire (pour un laitier mal granulé) qui présente le début de la cristallisation. La forme angulaire des particules de laitier et leur aspect poreux est dû à une immersion dans l'eau. Les particules de laitier totalement vitreuses indiquent que la température de ce laitier était élevée au moment de sa trempe (laitier chaud). Par contre si la température du laitier fondu n'est pas trop élevée, certains cristaux ont déjà pu se former dans la phase liquide et après sa trempe, ce laitier sera moins réactif (laitier froid) que le laitier chaud qui est plus vitreux. Les grains du laitier bien trempés ont une couleur beige ou grise, tandis que les laitiers plutôt froids ont une couleur beaucoup plus sombre qui peut varier du gris foncé au brun foncé. A l'aide d'un diffractogramme aux rayons X, on peut facilement vérifier si la trempe du laitier est faite convenablement ou

non. En l'absence de cristallites, le diagramme présente un halo centré en règle générale à la hauteur du pic principal de la méllilite.[31]

#### **4.3. Caractéristiques physico-mécaniques :**

La masse volumique apparente du laitier est d'environ 1 à 1,4 g/cm<sup>3</sup>, alors que sa masse volumique absolue varie entre 2,85 à 3 g/cm<sup>3</sup>. La forme du grain de laitier n'est pas fixe, elle diffère selon les méthodes de broyage. Les grains de laitier prennent souvent une forme irrégulière avec des angles et des bords clairs suite à leur broyage à l'aide d'un broyeur à boulets. Cependant, quand un vibro-broyeur de laboratoire est utilisé, la forme du laitier est généralement sphérique avec une surface relativement lisse. Le laitier granulé se présente sous forme d'un sable jaune ou beige, de granulométrie qui s'étale entre 0 et 5mm. Ce laitier développe une résistance mécanique élevée (130 à 180 MPa en compression simple) et une bonne résistance à la fragmentation.[32]

### **5. Utilisation des laitiers de haut fourneau :**

#### **➤ En cimenterie :**

L'emploi du laitier granulé en cimenterie est doublement important, car il permet à la fois des économies considérables d'énergie (réduction du combustible de 30 à 40 %), et permet d'obtenir des ciments présentant des propriétés variées. Le laitier peut produire un liant hydraulique de plusieurs façons.

- Premièrement, il peut être mélangé à du calcaire et être utilisé comme matière première pour produire du ciment Portland par le procédé à sec. Le clinker obtenu à partir de ces matériaux est souvent utilisé avec le laitier dans la fabrication du ciment portland au laitier. Cette utilisation du laitier est économique (car la chaux est présentée sous forme de CaO de sorte que l'on n'a plus à fournir l'énergie nécessaire pour la décarbonatation).
- Deuxièmement, dans la plupart des pays, le laitier granulé et broyé est utilisé dans le ciment portland comme ajout pour fabriquer des ciments portland au laitier.

#### **➤ Pour la confection des bétons**

Dans un béton, le squelette granulaire (sable et granulats naturels peuvent être remplacé par le laitier vitreux et le laitier cristallisé concassé respectivement). Le laitier concassé forme

d'excellent granulats pour le béton. De même le laitier granulé entre dans la confection des bétons légers (bétons cellulaires), et les briques de laitiers.[33]

➤ **Pour les travaux routiers**

Les utilisations concernent la construction des chaussées, des routes, autoroutes et les assises où on peut utiliser soit le laitier granulé ou le laitier concassé.

➤ **Dans l'industrie du verre**

En dehors d'une utilisation, de plus en plus rare, comme sable dans la construction, le laitier vitrifié est largement utilisé dans l'industrie du verre comme source d'alumine et de silice.

## **6. Comportement mécanique des ciments au laitier :**

Comme tous les ciments, le comportement mécanique des ciments au laitier est influencé par plusieurs facteurs tels que :

### **6.1. Influence de la composition chimique :**

Les caractéristiques physico-mécaniques des matériaux sont le reflet de la composition chimique. L'influence de cette composition sur la réactivité des ciments au laitier et par conséquent, sur leur comportement mécanique, est très complexe. Les oxydes ( $Al_2O_3$ ) et ( $CaO$ ) augmentent l'activité hydraulique du laitier, tandis que la ( $SiO_2$ ) la fait diminuer.

Pour avoir une bonne hydraulité, il faut que le rapport ( $CaO/SiO_2$ ) soit autour de 1,3; avec les rapports ( $SiO_2/Al_2O_3$ ) et ( $CaO/ Al_2O_3$ ) autour de 3 [30]. L'augmentation du ( $MgO$ ) jusqu'à 18 % est favorable ; contrairement au ciment Portland, il n'y a pas de risque de gonflement engendré par le ( $MgO$ ) libre pendant l'hydratation. La teneur en ( $Fe_2O_3$ ) n'a pas d'effet considérable sur la qualité du laitier; tandis que les oxydes de titane, de protoxyde et de manganèse doivent être limités.

Une faible quantité de sulfures de calcium (jusqu'à 7 %) accroît quelque peu l'activité du laitier. Une grande attention alors, a été donnée à la relation entre la composition chimique du laitier et la réactivité, et plusieurs formules sont développées afin d'obtenir une composition favorable du laitier [34].

### **6.2. Influence de la porosité de la pâte du ciment :**

La porosité de la pâte du ciment durcie est due essentiellement à la présence d'une quantité d'eau. Après durcissement du ciment, le reste de l'espace occupé par l'eau dans la pâte fraîche devient des pores. Ces pores sont devisés en:

- Pores capillaires qui dépendent de la proportion de l'eau de gâchage par rapport au ciment (E/C) et du degré de l'hydratation.
- Pores de gel (produits de l'hydratation).

Le volume de ces pores a un effet inverse sur la résistance mécanique du ciment: plus ce volume augmente, plus la résistance diminue. Cela est dû à la création de discontinuité dans la matière, qui engendre une concentration des contraintes dans des points singuliers et par suite la rupture de l'éprouvette ou de l'élément structurale, avant l'atteinte de la résistance mécanique réelle du ciment.

Les ciments de laitier ont une forte compacité grâce aux hydrates formés pendant l'hydratation du laitier, ce qui donne des pores de dimensions plus petites.

### **6.3. Influence de la finesse de mouture (surface spécifique) :**

La finesse du ciment joue un rôle essentiel dans la compacité du béton est par conséquence, dans le développement de sa résistance mécanique. Une finesse élevée assure un contact plus grand des grains de ciment, ce qui permet une forte réactivité et donne des résistances mécaniques élevées à long terme.

D'après, (Nacéri, 2005), en augmentant de la surface spécifique du laitier de 2000 cm<sup>2</sup>/g à 4800 cm<sup>2</sup>/g, l'activité du ciment au laitier augmente et par suite la résistance mécanique augmente aussi.

Ainsi, la faible aptitude du laitier à développer une bonne résistance au jeune âge peut être compensée par l'augmentation de sa finesse (activation mécanique).

### **6.4. Influence de la concentration de l'activant :**

L'augmentation de la concentration des activants alcalins influe positivement sur la résistance mécanique du ciment au laitier, est de même pour l'activation sulfatique avec le gypse. D'après (Puertas et al, 2000), dans le cas de la soude (NaOH), la résistance à la compression de la pâte de ciment (100% laitier) est plus de 35 MPa à 28 jours, pour une concentration de 2 mol/l, et supérieure à 50 MPa, pour une concentration de 10 mol/l. [31]



**CHAPITRE II :**  
Matériels et Méthodes

## Préambule :

L'emploi judicieux des matériaux utilisés dans la construction exige la connaissance de leurs diverses propriétés ; physiques, chimiques et mécaniques, permettant de faire un choix répondant à leur destination.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la présentation des caractéristiques de matériaux utilisés durant ce projet de recherche, ainsi que les différents essais expérimentaux réalisés.

### 1. Matériaux utilisés :

Les matériaux que nous avons utilisés dans le cadre de ce travail sont :

#### 1.1.Laitier :

Le laitier utilisé dans notre étude comme ajout au ciment provienne de complexe sidérurgique d'El-Hadjar wilaya d'ANNABA, les analyses chimiques sont effectuées au niveau de laboratoire de la cimenterie de MEFTAHA (SCMI),



Figure II.1 : laitier poudre

#### a) Composition chimique du laitier :

La composition chimique du laitier est présentée dans le Tableau II.1, elle a été déterminée par l'essai de Spectrométrie à Fluorescence aux rayons X.

Tableau II.1 : Composition chimique du laitier

Eléments	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	PAF
Teneur(%)	35,51	8,61	2,16	38,11	5,07	1,33	0,63	0,70	0,74

## 1.2.Clinker :

Le clinker qu'on a utilisé provient de la cimenterie de MEFTAH, dont la composition chimique et minéralogique est donnée par le tableau II.2 et II.3 respectivement.



Figure II.2 : clinker [34]

### a) Composition chimique et minéralogique du clinker :

Tableau II.2 : composition chimique du clinker

Eléments	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
Teneur(%)	21,69	5,55	3,62	66,72	0,78	0,24	0,47	0,30

Tableau II.3 : composition minéralogique du clinker

C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
61,56	15,76	8,59	11

### b) Modules caractéristiques du clinker :

- Le facteur de saturation en chaux (MLFS) compris entre 95 et 98

$$LSF = \frac{CaO}{(2,8 \times S\%) + (1,18 \times A\%) + (0,65 \times F\%)}$$

- Module silicique (MS), compris entre 2 et 3

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

- Module alumino-ferrique (MAF), compris entre 1,5 et 2,5

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

Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau II.4

**Tableau II.4 : Modules caractéristique du clinker**

Modules caractéristiques	LSF	SM	AM
Clinker (%)	95,82	2,37	1,53

### 1.3.Gypse :

Le dosage du gypse naturel (sulfate de calcium déshydraté, CaSO<sub>4</sub>. 2H<sub>2</sub>O) a été maintenu constant à 5% dans la préparation de tous les ciments, pour deux raisons, réguler la prise et ne pas masquer l'influence de la teneur en ajouts sur les propriétés mécaniques du ciment.

Les compositions chimiques du gypse sont données par le tableau II.5

**Tableau II.5 : Composition chimique du gypse**

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
Teneur(%)	5,3	1,45	0,93	25,99	2,94	35,07	0,2	0,12

### 1.4.Concassage du clinker :

Le clinker sortant du refroidisseur à 100°C est soumis à un concassage afin de faciliter le processus de broyage. L'opération se déroule dans un concasseur comme la montre la figure II.1



**Figure II.3 : Un concasseur a mâchoire**

### **1.5.Broyage des matériaux :**

Le broyage de la charge de matière préconcrassée, constituée de clinker, laitier et gypse est effectuée dans un broyeur à disques de laboratoire tournant à une vitesse de 700 (tour/minute), pour la production du ciment portland avec ajout, compte tenu de la diversité des expériences, le pourcentage du laitier dans la charge est soit 20%, 25%,30%,40%,50%. Après, un certain temps de broyage, l'échantillon de ciment est prélevé pour permettre sa caractérisation physico-chimique. La figure II.2 montre le broyeur a disque utilisé dans nos manipulations.



**Figure II.4 : Broyeur a disque Retsch RS 200**

## **2. Analyses chimiques :**

### **2.1.Analyse par spectromètre de fluorescence X :**

La spectrométrie de Fluorescence X est une technique d'analyse élémentaire qui permet de quantifier les éléments chimiques présents dans un échantillon c'est-à-dire connaître la composition de l'échantillon et leurs teneurs.

- **Mode opératoire :**

- a) **Préparation des pastilles :**

On pèse  $10 \pm 0.1$ g de la matière à analyser après l'avoir séché si elle est humide et 0.6g de cellulose et on verse la matière dans le broyeur à disque pour une durée de 1min puis on récupère la matière broyée. On verse la matière dans la pastilleuse et la presse avec la capsule.



**Figure II.5 :** La pastilleuse HERZOG

- b) **Le spectromètre de FX :**

En dernière étape on procède à l'analyse par fluorescence X en utilisant le programme correspond à l'échantillon à analyser.

Les résultats d'analyse des différents éléments sont exprimés en pourcentage.



**Figure II.6 :** La Spectroscopie à fluorescence X 'XRF'

### **2.2.Détermination de la perte au feu :**

Elle a pour but de déterminer le pourcentage de H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> dégagé pendant la calcination.

- **Mode opératoire :**

On pèse le creuset ( $m_1$ ) après avoir taré et ajouter 2g de matière ( $m_2$ ). On porte le creuset et le contenu dans un four à moufle à  $950^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$  ° pendant 30 minutes, ensuite on retire le couvercle et laisse le creuset encore 10 min supplémentaires après peser( $m_3$ ).

Le pourcentage de la PAF est calculé selon la formule suivant :

$$\% \text{ PAF} = (m_2 - m_3) \times 100 / (m_2 - m_1)$$

**$m_1$**  : masse Creuset

**$m_2$**  : masse de creuset + produit

**$m_3$**  : masse de creuset +Produit après calcination



**Figure II.7:** Lefour de calcination à 950°C

<b>Pourcentage Du Laitier(%)</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b>PAF(%)</b>	2,31	2,27	2,35	2,35	2,41

Les résultats sont présentés dans le **tableau II.6**

**Tableau II.6 :** Les résultats de la PAF des différents pourcentages de laitier

### **2.3.Détermination de la chaux libre :**

La détermination de la teneur en chaux libre (oxyde de calcium de formule CaO).La teneur en chaux libre définit la qualité et le degré de cuisson de clinker.

- **Mode opératoire :**

On pèse  $1 \pm 0.1g$  de l'échantillon séché (ciment) et introduire la quantité pesée dans un Erlenmeyer de 250 ml, on verse dans cet Erlenmeyer 50 ml d'éthylène glycol et agiter fortement puis le mettre dans la plaque chauffante pour chauffage à une température de 80°C. On filtre le mélange et on titre le filtrat avec une solution de HCl(0.1N) en présence du bleu de bromothymol (3 gouttes) jusqu'à le changement de la couleur et lire le volume obtenu dans la burette de filtre numérique.

D'après les volumes obtenus, nous pouvons conclure les pourcentages de CaO libre résumé dans le tableau II.7 et par la relation :

$$\% \text{ CaO (l)} = V \text{ (HCl)}$$

**Tableau II.7:** Résultats de % CaO des différents volumes  $V_{\text{HCl}}$  [35]

HCl(mL)	CaO(%)	HCl(mL)	CaO(%)
0,10	0,03	2,10	0,57
0,20	0,05	2,20	0,60
0,30	0,05	2,30	0,62
0,40	0,11	2,40	0,65
0,50	0,14	2,50	0,68
0,60	0,16	2,60	0,71
0,70	0,19	2,70	0,73
0,80	0,22	2,80	0,76
0,90	0,24	2,90	0,79
1,00	0,27	3,00	0,82
1,10	0,30	3,10	0,84
1,20	0,33	3,20	0,87
1,30	0,35	3,30	0,90
1,40	0,38	3,40	0,92
1,50	0,41	3,50	0,95
1,60	0,43	3,60	0,98
1,70	0,46	3,70	1,01
1,80	0,49	3,80	1,03
1,90	0,52	3,90	1,06



**Figure II.8:** La burette de filtre digital et la pompe de filtration

Les résultats sur le tableau suivant représentent les teneurs en chaux libre des différents pourcentages de laitier.

**Tableau II.8 :** les résultats de CaO libre des différents pourcentages de laitier

Pourcentage Du laitier(%)	20	25	30	40	50
CaOL	0,73	0,71	0,62	0,50	0,49

### 3. Analyses Physico-mécaniques :

#### 3.1.Mesure des refus par tamisage ALPINE :

Elle a pour but de déterminer le pourcentage des refus de ciment après le broyage. Le tamis a air ALPINE consiste dans l'utilisation contrôlée du courant d'air, pour disperser la matière, entraîner le fin (les fines) à travers les mailles du tamis, nettoyer le tamis.

Les refus sont déterminés pour contrôler l'état de fonctionnement du broyeur et le degré du broyage.

- **Mode opératoire :**

On pèse( $m_1$ )  $25 \pm 0.5$ g de matière à tamiser et on disperse la masse du produit pesé sur le tamis puis pose le couvercle et démarrer le tamisage avec un temps de 3min, lorsque le tamisage été effectué on démonte le couvercle et enlève délicatement à l'aide d'un pinceau tout le matériau final adhérait la quantité de refus obtenue après le tamisage, et pesé ( $m_2$ ).

Le pourcentage de refus est calculé :

$$\% \text{Refus} = (m_2/m_1) \times 100$$



**Figure II.9:** L'appareil de refus par tamisage ALPINE

Les résultats de refus des échantillons sont montrés dans le tableau II.9

**Tableau II.9 :** Les Résultats de Refus des différents pourcentages du laitier

Pourcentage du laitier(%)	20	25	30	40	50
% Refus (tamis45µm)	25,80	23,40	23,44	27,28	23

### 3.2.Mesure de la surface spécifique par la méthode Blaine: « I A442 »

Pour la détermination de la finesse du ciment ou bien le degré de broyage

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 spécifiée.

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

- **Mode opératoire :**

On choisit la surface spécifique sur l'appareil puis on détermine le type de ciment et on prend la valeur de la masse. Après on pèse une quantité de ciment  $m=2.648g$  et Mettre le papier filtre avant d'appliquer la poudre, puis pressez la poudre au maximum, mettre un autre papier filtre et ferme la cellule. On met la cellule dans l'appareil, puis appuyer sur le bouton de démarrage et on attend quelques secondes que le résultat apparaisse.

Calculer la surface spécifique sur la forme suivante :

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

Avec :

**K :** constante de l'appareil (K= 2,106)

**ρ:** La masse volumique du ciment en  $g/cm^3$

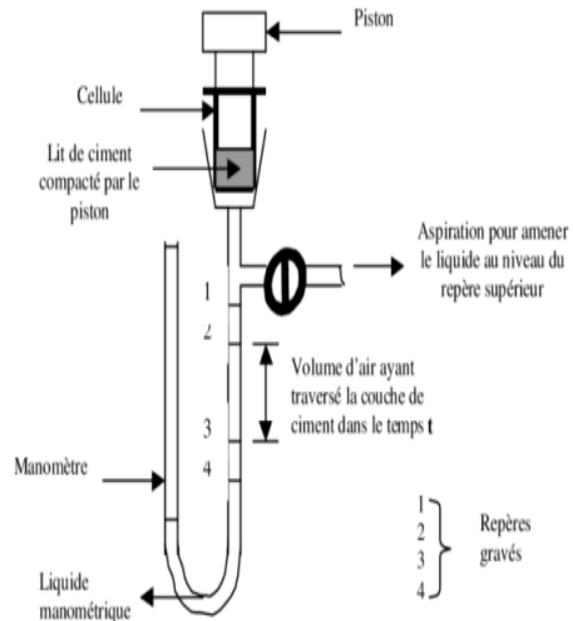
**η:** Viscosité de l'air à la température de l'essai en poise

**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  $m= \rho_c.v.e$

**v:** La volume de cellule  $v=1,848 \text{ cm}^3$

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



**Figure II.10 :** Appareil de Blaine **Figure II.11:** Principe de fonctionnement de Blaine[36]

**Tableau II.10 :** Les résultats de surface spécifique de Blaine des différents taux du Laitier

Pourcentage du laitier(%)	20	25	30	40	50
SSB ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	2874	3268	3776	3598	3978

### 3.3.Préparation des éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{cm}^3$

Ce mode opératoire a pour but de décrire les étapes à suivre pour préparer les éprouvettes  $4 \times 4 \times 16 \text{cm}^3$ .

- **Mode opératoire :**

- a) **Pesée des constituants :**

Le mortier normal se compose d'une partie du liant à essayer, de trois parties de sable normal et d'une demi-partie d'eau (règle  $E/C=0.5$ ). Les constituants sont pesés avec une précision de 0.5%.

Dans le cas de préparation de trois éprouvettes 4x4x16 les quantités sont respectivement les suivantes :

**Tableau II.11:** composition de mortier

Sable	Ciment	L'eau
1350±5grammes	450±2grammes	225±1ml

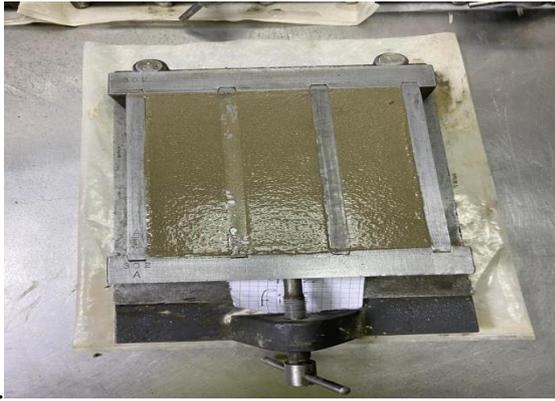
**b) Malaxage :**

On allume d'abord le mélangeur puis ont versé l'eau et le ciment dans le récipient, ont mis le malaxeur en marche à la vitesse lente pendant 30s, Après on ajoute le sable dans le récipient, malaxer le tout 30 et a laissé le mélange ; Puis ont malaxé le sable 30s supplémentaire à la vitesse rapide, arrêter le mélange pendant 90s avec le batteur démonté de son axe racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune partie du mortier échappe au malaxage. Pour finir le mixage reprendra pendant 2min à vitesse rapide et s'arrêtera.

**c) Moulage :**

Les éprouvettes sont moulées au moyen de l'appareil à chocs. Le malaxage du mélange mortier étant terminé, disposer celui-ci sur une plaque non réactive au liant et non absorbante ; former une galette approximativement rectangulaire. Puis mettre la machine en marche pour 60 chocs et recommencer les mêmes opérations pour la deuxième couche. Après 60 nouveaux chocs le moule et la hausse sur une faible hauteur sont remplis de mortier.

Le moule étant retiré de la machine et débarrassé de sa hausse araser le mortier avec l'arête d'une règle métallique plate maintenue verticale par un mouvement de scie de faible amplitude et perpendiculaire à la longueur des éprouvettes.



**Figure II.12 :** Le moule d'éprouvette



**Figure II.13 :** L'appareil à choc

#### **d) Conservation des éprouvettes dans l'eau :**

Après Le moulage les éprouvettes sont stockées dans leurs moules pendant 24 heures dans une chambre d'humidité de  $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}$ . et une humidité de 90% , ensuite elles sont démoulées.

Les éprouvettes sont plongées sans retard dans des bains d'eau à régulation de température  $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}$ .

#### **3.4.La résistance à la compression :**

Ce mode opératoire a pour objet de déterminer la résistance mécanique de notre ciment :

Après 2 jours 7 jours et 28 jours,nous apportons nos éprouvettes du ciments que nous avons préparés dans le moulage , puis nos les divisons en moitiés pour mesurer la stabilité de chaque partie.

A la fin on le met dans la machine qui mesure la stabilité et va nous donner la résistance de notre ciment.

La charge doit croître jusqu'à la rupture à une vitesse telle que l'accroissement de contrainte soit compris entre 1 et 2 MPa/s. toutefois, jusqu'à la moitié de la charge de rupture présumée, la charge peut croître rapidement



**Figure II.14:** L'appareil de mesure la stabilité

Le tableau II.12 résume tous les résultats obtenus par mesure de la résistance a la compression des mortiers.

<b>Pourcentage du laitier(%)</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b>Rc02j(MPa)</b>	9,65	9,20	8,45	5,80	5,20
<b>Rc07j(MPa)</b>	26,20	24,25	21,85	15,45	14,35
<b>Rc28j(MPa)</b>	42,9	41,8	39,9	31,8	31,45

**Tableau II.12 :** les résultats de résistance des différents pourcentages du laitier



**CHAPITRE III :**  
Résultats et Discussion

## 1. Caractérisation chimique des matériaux :

### 1.1. Composition chimique des matériaux :

La composition chimique indiquée dans le Tableau III.1 a été déterminée par l'essai de Spectrométrie à Fluorescence aux rayons X au laboratoire de la cimenterie de MEFTAH

**Tableau III.1** : Les compositions chimiques du ciment au laitier

	20%	25%	30%	40%	50%
<b>SiO<sub>2</sub></b>	26.00	26.69	27	27.94	30.32
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5.93	6.07	6.13	6.29	6.77
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3.03	2.99	2.87	2.60	2.48
<b>CaO</b>	60.1	59.31	58.22	54.65	54.56
<b>MgO</b>	1.71	1.76	1.80	1.84	2.09
<b>SO<sub>3</sub></b>	2.20	2.21	2.27	2.34	2.45
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.78	0.78	0.77	0.76	0.78
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.29	0.29	0.28	0.22	0.27

Il en ressort que d'une manière générale le CaO est majoritaire dans la composition suivie du SiO<sub>2</sub> pour tous les taux de laitier. A titre d'exemple, pour un pourcentage de laitier de 20% les taux de CaO et SiO<sub>2</sub> sont 60.1% et 26% respectivement.

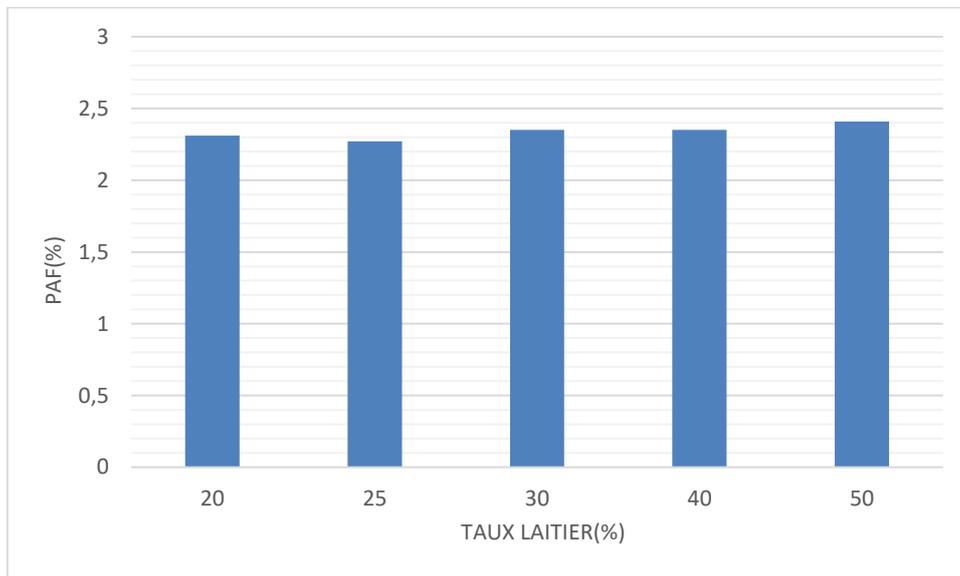
D'autre part ; lorsque la teneur en laitier augmente, on constate que le pourcentage de SiO<sub>2</sub> augmente de 26% à 30,32% et le pourcentage de CaO diminue de 60,1% à 54,56%.

Par ailleurs, le ciment au laitier contient du Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, SO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O en faibles et variables proportions.

Nous avons tenté de déterminer la composition minéralogique tel que C<sub>3</sub>S de nos échantillons, toutefois, nous avons été confrontés à des résultats négatifs ce qui montre que l'appareil spectrométrie de fluorescence X n'a pas été étalonné pour ce type d'ajout sachant qu'il ne fait pas partie des analyses usuelles de l'entreprise.

## 1.2.Effet du taux de laitier sur la perte au feu :

Les échantillons des ciments préparés sont introduits dans le four à 950°C. Les résultats sont présentés dans la figure III.1



**Figure III.1 :** Variation de la PAF en fonction du pourcentage du laitier

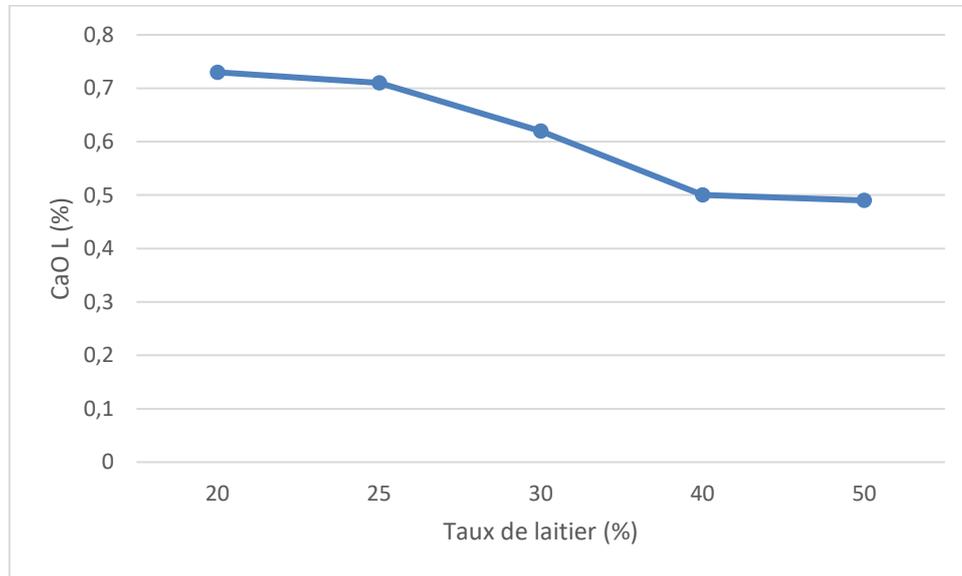
On remarque que la perte au feu du ciment est faible pour toutes les proportions de laitier et ceci est expliqué par l'origine de laitier qui provient du haut fourneau.

On constate qu'il n'y a pratiquement pas eu de changement avec l'augmentation des proportions de laitier. A titre d'exemple les pourcentages de perte au feu sont entre 2.27% et 2.41%.

Sachant que la valeur caractéristique normale de la perte au feu PAF est prise entre 1% et 15%, ce qui montre que nos résultats relatifs à la perte au feu sont conformes. [37]

### 1.3.Effet du taux de laitier sur la chaux libre :

Les résultats sur le graphique suivant représentent la détermination de la chaux libre pour les différents échantillons étudiés.



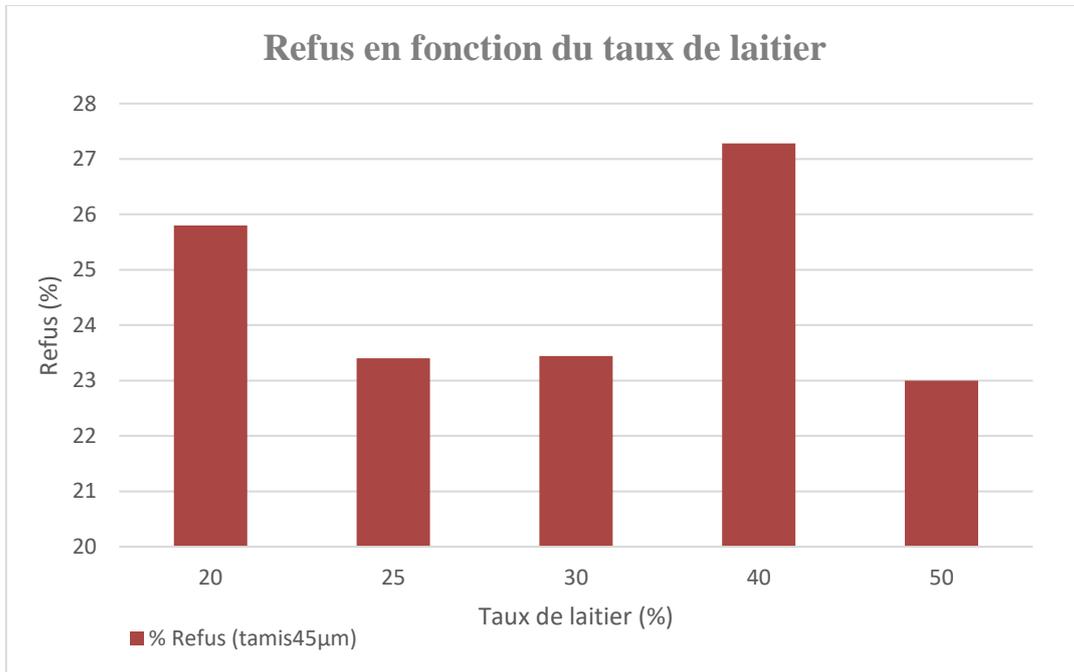
**Figure III.2 :** Variation de la chaux libre en fonction du pourcentage de l'ajout laitier

On remarque dans l'évolution des pourcentages du l'ajout laitier une diminution de la variation de la chaux libre marquant une détente de sa valeur dans le pourcentage 40% qui expriment une turbulence subite dans notre expérience.

Au principe la variation de la chaux libre diminue avec l'augmentation de l'ajout, plus le pourcentage de laitier augmente plus la chaux libre diminue puisque le pourcentage de clinker diminue vu qu'il est responsable de la libération de la chaux.

## 2. Caractérisation physico-mécanique :

### 2.1.Effet du taux de laitier sur les Refus :

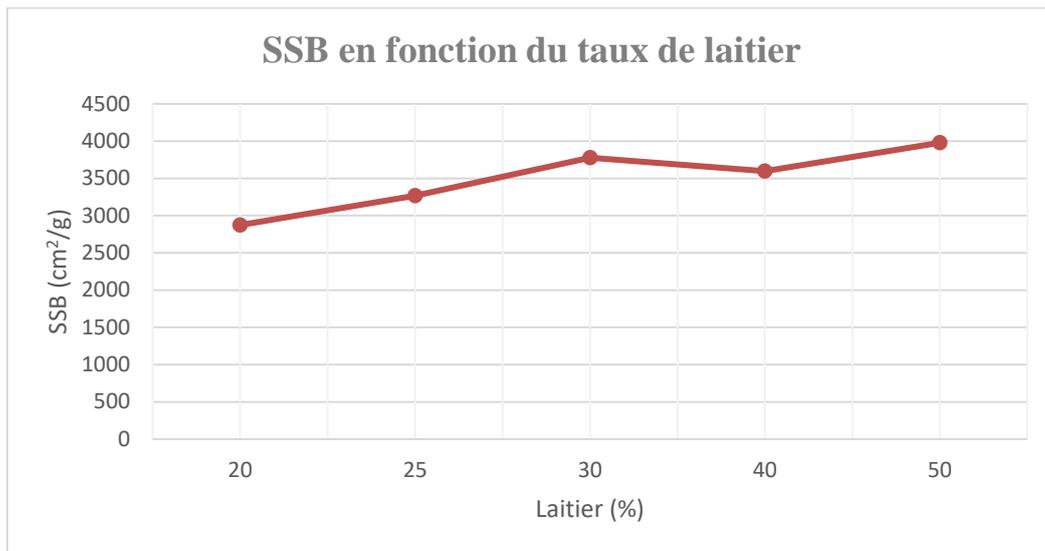


**Figure III.3 :** Variation de pourcentage du refus en fonction pourcentage d'ajout

D'après les résultats obtenus dans la figure III.3, on peut observer que les taux de refus varient légèrement en fonction des pourcentages de laitier. On constate une diminution du refus avec l'augmentation du pourcentage de laitier dans le ciment. Par contre, il y a une perturbation pour 40 % où il y a une augmentation du refus, ceci peut être attribue cette augmentation au facteur de broyage du ciment.

Cela suggère que l'incorporation de différents pourcentages de laitier peut avoir un effet sur la granulométrie du ciment final.

## 2.2.Effet du taux de laitier sur la surface spécifique de Blaine :



**Figure III.4 :** Variation de la surface spécifique du Blaine en fonction du taux de laitier

Les résultats de la figure III.4 présentent l'effet de l'ajout laitier sur la surface spécifique du ciment

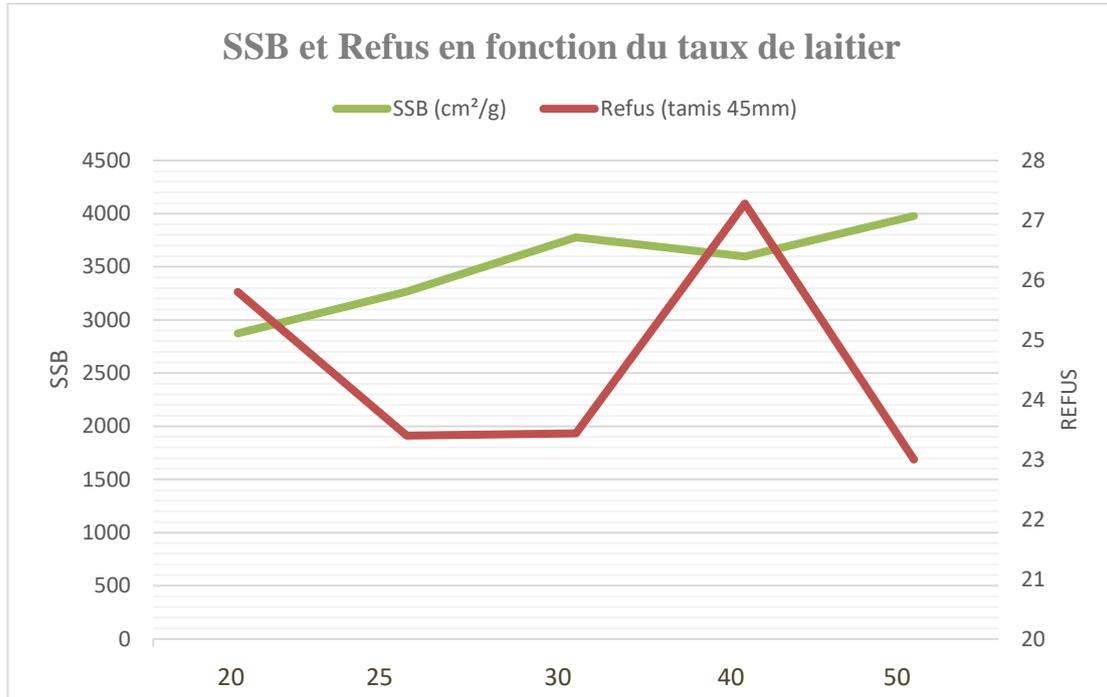
La SSB augmente en fonction du pourcentage de laitier dans le ciment. Cette tendance est visible en comparant les valeurs de la SSB pour des pourcentages de laitier plus faibles (20 et 25) avec celles pour des pourcentages de laitier plus élevés (40 et 50). On peut observer une augmentation progressive de la SSB à mesure que le pourcentage de laitier augmente. Cependant, il y a une légère variation des valeurs de la SSB même pour des pourcentages de laitier similaires. Par exemple, le pourcentage de Laitier de 30% a une SSB de 3776 cm<sup>2</sup>/g, tandis que le pourcentage de Laitier de 40% a une SSB légèrement inférieure de 3598cm<sup>2</sup>/g. Cela peut, indiquer qu'il y a d'autres facteurs qui influencent les résultats de la SSB en plus du pourcentage de Laitier tels que le broyage des particules.

On constate que le pourcentage de Laitier a un effet sur les résultats de la SSB du ciment. Une augmentation du pourcentage de Laitier conduit généralement à une augmentation de la SSB, ce qui indique une augmentation de la finesse du ciment.

Cela est cohérent avec le fait que le Laitier, en tant qu'ajout, peut améliorer la réactivité chimique et les propriétés de liaison du ciment. [38]

### 2.3.La relation entre refus et SSB :

La figure II.5 présente la relation entre la surface spécifique de Blaine et les teneurs des refus avec la variation des proportions de laitier



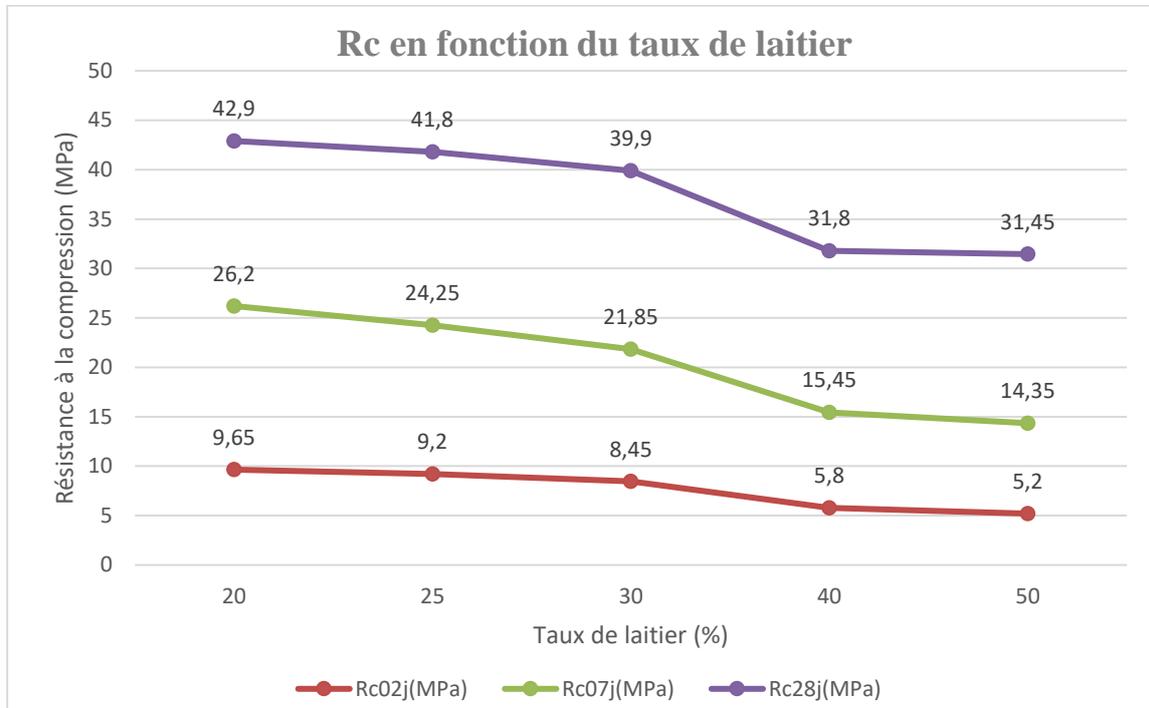
**Figure III.5 :** Variation des Refus et SSB en fonction du taux de laitier

La finesse de broyage d'un ciment est exprimée par sa surface spécifique. Plus le broyage est fin, plus la surface spécifique est importante. Le refus est alors déterminé par le pourcentage du ciment dont les dimensions des grains sont supérieures aux dimensions de la maille spécifiée.

Nous avons constaté que l'augmentation de la surface spécifique Blaine et du pourcentage de laitier suit une diminution du refus, donc la relation est inverse.

## 2.4.La résistance mécanique :

La figure III.6 résume tous les résultats obtenus par mesure de la résistance à la compression des mortiers à différents âges



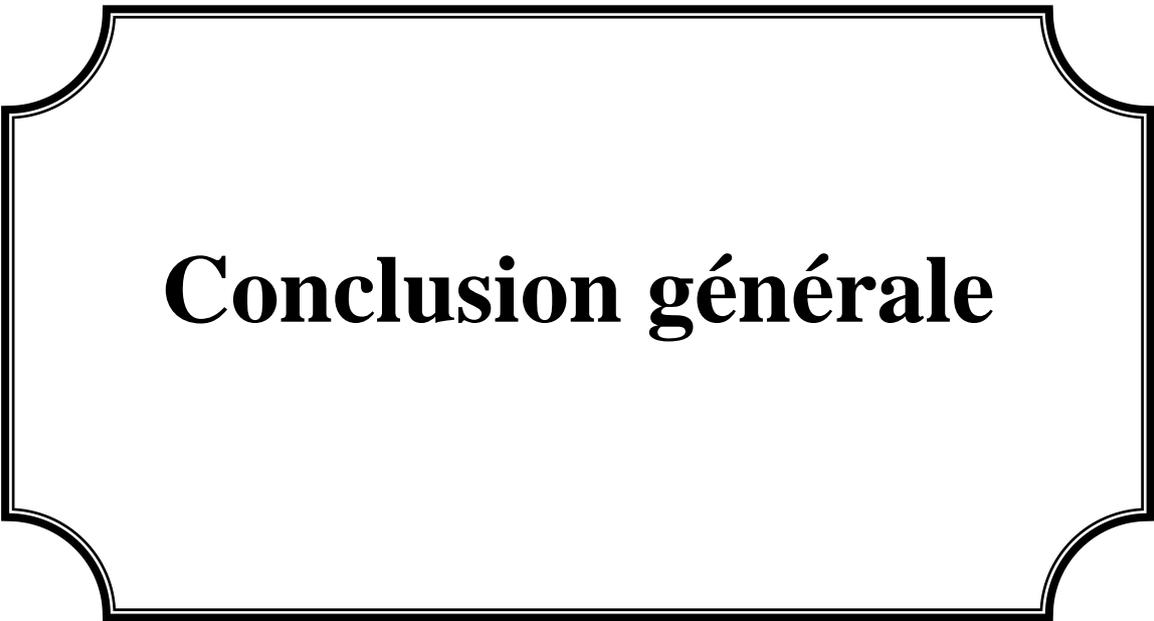
**Figure III.6 :** Effet de l'ajout laitier sur la résistance à la compression des mortiers

La figure III.6 montre que la résistance en compression baisse d'une manière générale avec l'accroissement de la teneur en laitier aux différents âges de durcissement (2j, 7j, 28j). Cette diminution de la résistance est due au fait que la réaction chimique n'est pas prédominante aux jeunes âges, ceci mène à une hydratation du minerai  $C_3S$  (silicate tricalcique) et  $C_2S$  (silicate bi calcique) moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances. [39]

Pour la diminution de la résistance à 28j en fonction du le taux d'ajout laitier, la cause principales substitué de clinker par le laitier, le clinker c'est le premier responsable sur le développement des résistances.

A titre d'exemple à 28 jours, la résistance diminuée de 42,9 MPa à 31,45 MPa, cela conduit à une classification des échantillons de ciment selon la résistance [40] :

- Les échantillons 1 et 2 (20% et 25%) sont classé à la résistance 42,5MPa,
- Les échantillons de 3 à 5 (30%, 40%, 50%) sont classés à la résistance 32,5MPa.



# **Conclusion générale**

# Conclusion

Ce travail a porté essentiellement sur l'étude de l'influence du laitier de haut fourneau sur l'évolution des caractéristiques de ciment et les résistances mécaniques des mortiers.

Cette étude de ciment avec l'ajout de laitier, a été menée par deux étapes principales :

- La préparation du ciment avec différents pourcentages de laitier allant de 20 à 50% par pas de 5%.
- L'analyse chimique et l'analyse physique.

Les résultats obtenus dans cette étude peuvent mener aux conclusions générales suivantes :

- L'augmentation de taux de laitier modifie les proportions relatives des différents composants dans le ciment.
- La composition chimique du ciment a un effet significatif sur sa résistance dépend de divers facteurs, tel que la réactivité de la silice
- Le pourcentage du clinker dans le ciment est le responsable sur l'évolution de la résistance mécanique car il contient : le  $C_3S$  et  $C_2S$  qui sont les deux principaux minéraux qui assurent le développement des résistances mécaniques à court et à long terme.
- Il existe une relation inverse entre la surface spécifique et le refus pour chaque augmentation de la surface spécifique de ciment le refus diminue.
- La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout (laitier)
- Pour la teneur en laitier de 20% la résistance égale à 42.9MPa ce qui traduit une meilleure résistance enregistrée parmi les différents pourcentages de l'ajout laitier.
- L'influence du taux d'ajout (laitier) sur les propriétés physiques et mécaniques du matériau (mortier) donne un changement de type de ciment
- Les essais mécaniques réalisés sur les mortiers permettent de classer les ciments étudiés dans les catégories normatives classe 42.5 N 32,5 N.
- L'utilisation des ajouts cimentaire va nous permettre de gagner sur plan économique car les laitiers sont des sous-produits, un gain aussi au niveau technique puisque on ils

nous ont donné des résistances importantes et surtout un gain sur le plan écologique puisque on va utiliser ces déchets, en plus on va diminuer la production de ciment ce qui diminue le dégagement du CO<sub>2</sub> des cimenteries.

### **Perspectives**

- Optimiser la teneur en laitier dans le mélange de ciment pour assurer la formation optimale de C-S-H tout en évitant des niveaux excessifs de SiO<sub>2</sub> qui pourraient compromettre la résistance et la durabilité du ciment
- Sélectionner un type de laitier réactif et de haute qualité.
- Utiliser des agents d'activation pour stimuler la réactivité du laitier: Des agents d'activation chimique spéciaux comme l'hydroxyde alcalin du NaOH ou du KOH peuvent être ajoutés au mélange de ciment pour accélérer le processus de durcissement et compenser le retard induit par le laitier. Ces agents aident à stimuler la réaction d'hydratation et à promouvoir la formation de composés résistants, améliorant ainsi la résistance globale du ciment

## Référence bibliographique

- [1] B. Nicolas « Etude des caractéristiques physico-chimiques de nouveaux bétons éco respectueux pour leur résistance à l'environnement dans le cadre du développement durable » Thèse du doctorat ; Université de Strasbourg Discipline, 5 septembre 2012.
- [2] S. Catinaud « Durabilité à long terme de matériaux cimentaire, avec ou sans fillers calcaires, en contact avec des solutions salines »; Thèse du doctorat; Université de LAVAL Canada; décembre 2000.
- [3] J.M. Auvray « Elaboration et caractérisation à haute température de bétons réfractaire à base d'alumine Spinelle » thèse de doctorat, université de Limoges Science et technologie de santé 2003
- [4] A.BENGUEDOUAR ; « Synthèse et caractérisation de silicates de calcium hydrates (C.S.H) hybrides », Mémoire Magister en chimie, Université de YAOUNDE I ,2013
- [5] Madjid SAMAR « Le lien entre les paramètres process et qualité » Septembre 2020
- [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] J. Beauchamp; Mécanique des roches et des sols; Cours en ligne; Université de Picardie Jules Verne; <http://www.u-picardie.fr/~beaucham/eadaa/mecasol.htm> ; septembre 2003.
- [8] Amina Sidi Aïssa, Leila Sidi Yakoub « Optimisation du taux des incuits pour la fabrication de ciment CPj CEM I A/42,5 », Diplôme DEUA en chimie industrielle, Département de chimie, Université Abou-Bakr Belkaïd, 2007/2008, P.4.
- [9] BOUGLADA MOHAMED SALAH « Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier » ; thèse de magister, université de Msila 2007/2008.
- [10] Elodie Romilliat « Étude des modes d'action d'agents de mouture sur le broyage du clinker », Génie de procédés, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Université Jean Monnet de Saint-Etienne. N°d'ordre : 396GP, France, 20janvier 2006, P.3-8.
- [11] G. DREUX, « Nouveau guide du béton », Edition Eyrolles ,2ème édition, 1979.17.
- [12] Mohammed Amine Benhadda « La durabilité du mortier à base de ciment de Béni-Saf vis-à-vis de milieux basiques NaOH et NH<sub>4</sub>OH », Diplôme d'ingénieur d'étaten chimie industrielle, Génie des procédés, Université Abou-Bakr Belkaïd, 2011/2012,

P.2-13

- [13] Abdelkader Ameer « Influence de l'ajout pouzzolane sur la résistance du ciment de la cimenterie de Saïda », Diplôme d'ingénieur d'état en chimie et génie des procédés, Département de chimie, Université Abou-Bakr Belkaïd, 13/11/2006, P.13
- [14] Journal officiel de la République Algérienne N° 27. 26 ,Rajab 1437 , 4 mai 2016
- [15] 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.
- [16] Document de référence sur les meilleures techniques disponibles,« Industries duciment, de la chaux et de la magnésie », 2010.
- [17] 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.
- [18] AZZOUZ Walid Tewfik, REZIG Mokhtaria, « Valorisation des poussières de farine crue issues de l'industrie ciment dans le traitement des eaux urbaines », Mémoire de Licence, Université MOULAY TAHAR, Algérie, 2014.
- [19] 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.
- [20] MEBARKI Hanen, « Etude comparative des clinkers de l'ouest Algérien : Analyse Physico-chimique et Applications », Mémoire de Master, Université TLEMCEM, Algérie, 2013.
- [21] 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.
- [22] BERREHAIL Walid, « Automatisation et supervision d'un système déchargement duciment en vrac à l'aide d'un automate programmable S7-300 et logiciel WinCC», Mémoire de Master, Université MOHAMED KHIDER, Algérie, 2017
- [23] BENCHEIKH Amel, « Contribution à la caractérisation d'un ciment à base de laitier +5 % de calcaire», Mémoire de Master, Université MOHAMED BOUDIAF, Algérie, 2016.
- [24] Seidel G., Huckauf H., Jochen S., Technologie des ciments, chaux, plâtre : Processus et installations de cuisson, Septima, Paris (1980).

- [25] Derradj, H., & Benmessaoud, S. E. (2016). Formulation des bétons à haut performances (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- [26] [http://www.lafarge.fr/wps/portal/6\\_5\\_4\\_1\\_PVD\\_ET?WCM\\_GLOBAL\\_CONTEXT=/wps/wcm/connect/Lafarge.com/AllPV/VI47/ViFr#](http://www.lafarge.fr/wps/portal/6_5_4_1_PVD_ET?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/wps/wcm/connect/Lafarge.com/AllPV/VI47/ViFr#)
- [27] l'emploi d'ajouts cimentaires dans les revêtements de chaussée en béton exposés aux cycles de gel-dégel et aux produits chimiques de déglacage \* CEMENT ASSOCIATION OF CANADA \* Par Norman F. MacLeod, ing. Mars 2005 page 10-12
- [28] SOLLAC, 1975. Sidérurgie générale, tome 1 (du minerai à l'acier), 315 pages.
- [29] Mourad BEHIM. «Sous-produits industriels et développement durable : réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'el hadjar dans les matériaux a matrice cimentaire». Thèse de Doctorat, Université d'Annaba, 2005
- [30] M. Burteaux. Laitiers de haut fourneau. Technique de l'ingénieur, M 7 425. 1995. pp. 1-9
- [31] F.M. Léa. The chemistry of cement and concrete. «La chimie du ciment et du béton». Chemical publishingco. Inc. New York, N.Y. 1971.
- [32] Vénuat.L (La Pratique des ciments, mortiers et bétons). 1989
- [33] A. Nacéri et I. Messaoudene. The chemical and physical effects of the granulated blast furnaceslag on concrete compressive strength. «Les effets chimiques et physiques du laitier du haut fourneau sur la résistance à la compression du béton». World Journal of Engineering 3(3), 2006. pp. 45-51.
- [34] Rais Salah-eddine «L'influence de la granulométrie des constitutions du ciment sur l'optimisation du taux d'ajout du laitier ajouté » Mémoire Master, ENSMM Annaba
- [35] T.Fenniche « Manuel des modes opératoires chimiques SCMI » 2014
- [36] D.Oussama « Influence des Eléments Mineurs et Majeurs Sur la Réactivité du Clinker » Mémoire Master, université de Biskra 2020
- [37] Houari Slimane « Etude de caractérisation de la production du ciment Portland par l'ajout de fumée de silice » Mémoire Master, Université Blida 2022
- [38] Salhi Kamel « Etude de l'influence de l'ajout du sable de dune et le laitier granulé finement broyés au ciment sur la stabilité de béton » Mémoire de Magister, 2007
- [39] Tebbina Narimene « IMPACT FINESSE DE CIMENT SUR LE TEMPS DE PRISE ET LE DURCISSEMENT DU MORTIER » Mémoire Master, Université Biskra, 2022
- [40] Miloud Beddar « INFLUENCE DE L'AJOUT DU LAITIER SUR LES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES ET MECANIQUES DU CIMENT

PORTLAND AU LAITIER(CEM II) ET CIMENT DE HAUT FOURNEAU ( CEM III ) »Mémoire Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016