

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT 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 Chimique**

Intitulé de mémoire

**Etude de caractérisation de la production du  
ciment Portland par l'ajout de fumée de silice**

**Présenté par**

**-Houari Slimane  
-Bouhira Abdelkader Amir  
-Hammouda Aymen**

**Encadré par**

**Mme. Nadji**

**Soutenue Le 03 /07/2022**

**Promotion 2022**



# Remerciement

*Avant tout, je tiens à remercier Dieu le tout puissant de  
m'avoir donné tous les  
moyens et m'a dirigé vers ce qui est le meilleur.  
J'adresse mes remerciements à l'ensemble du personnel du  
laboratoire,  
Ainsi qu'à tous les doctorants, qui m'ont permis de réaliser  
ce stage dans  
les meilleures conditions au niveau du laboratoire de  
recherche à la cimenterie GICA de MEFTAH.  
Mes remerciements vont également à mon encadreur  
Madame. NADJI, de m'avoir encadré et orienté dans ce  
modeste travail.  
Je tiens à remercier ..... de m'avoir fait l'honneur  
de présider le jury de soutenance.  
Je tiens exprimer ma gratitude à .....pour avoir  
Examiné et évalué mon mémoire.  
Je tiens à exprimer mes remerciements à M.FARID et  
M.HAMID pour tout le  
Soutien qui m'ont donné au laboratoire  
En fin, mes remerciements les plus sincères vont à ceux qui  
ont contribué de  
Près ou de loin à la réalisation de ce travail.*



# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A mes parents*

*Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler.*

*Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.*

*A mes frères wail AbdelMohsen, ma fiancée nesrine et mon cousin Abdel Nasser et qui m'ont soutenu tout au long de ce projet.*

*A mes collègues qui m'ont aidé pendant Toute la période du stage*

*A toute ma famille, et mes amis,*

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.*

*Slimane*





# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A mes parents*

*Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler.*

*Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.*

*A mes sœurs Meriem et son mari Ishak, Douaa et mon frère Youcef et son épouse Amina que j'aime beaucoup et qui m'ont soutenu tout au long de ce projet.*

*A mes collègues qui m'ont aidé pendant Toute la période du stage*

*A toute ma famille, et mes amis,*

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.*

**AYMEN**





# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A mes parents Surtout ma perle de vie maman  
Aucun hommage ne pourrait être à la  
hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler.*

*Que Dieu leur procure bonne santé et longue vie.*

*A mes sœurs Yasmine , Nour et Ikram que j'aime  
beaucoup et qui m'ont soutenu tout au  
long de ce projet.*

*A mes frères et mon cher ami Habib qui m'a soutenu  
durant tout mon chemin*

*Et aussi mes collègues qui m'ont aidé pendant  
toute la période du stage*

*A toute ma famille, et mes amis ,  
Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour  
que ce projet soit possible, je vous dis merci.*

**AMIR**



## **Résumé :**

Les tendances du monde d'aujourd'hui est vers à la recherche de matériaux plus résistants et plus efficaces.

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

Ainsi, l'utilisation de sous-produits de l'industrie lourde qui facilite la fabrication à faible coût de divers liants hydrauliques.

D'autre part leurs utilisations ont pour objectif de réduire la consommation de clinker, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement.

C'est dans ce contexte que cette étude a été menée. Elle cherche à développer un nouveau composé cimentaire à base de fumée de silice. Les résultats finals montrent que l'ajout de 10% de fumée de silice dans un broyeur à haute énergie améliore les principales propriétés physiques du nouveau liant et ses propriétés mécaniques sont comparables au Portland composés de ciment à résistance de haute performance égale à 69.05 MPa.

**Mots clés :** Ajout cimentaires , Matériaux cimentaires , Ciment , Clinker , fumée de silice, Portland composé, Résistance, Propriétés mécanique et physique, Environnement , Broyeur , Energie

## ملخص

تتجه اتجاهات عالم اليوم نحو البحث عن مواد أكثر مقاومة وكفاءة

تعد المواد الإضافية الإسمنتية حاليًا من بين أحدث التطورات في إنتاج الأسمنت ، لأن استخدامها يؤدي إلى تحسين الخواص الميكانيكية للمواد الإسمنتية

وبالتالي، فإن استخدام المنتجات الثانوية للصناعة الثقيلة يسهل التصنيع منخفض التكلفة لمواد رابطة هيدروليكية متنوعة

من ناحية أخرى، تهدف استخداماتهم إلى تقليل استهلاك الكلنكر ، مما يساهم بطريقة بسيطة واقتصادية في حل المشكلات المتعلقة بالبيئة

في هذا السياق أجريت هذه الدراسة. يسعى إلى تطوير مركب أسمنتي جديد يعتمد على دخان السيليكا. تظهر النتائج النهائية أن إضافة 10٪ من دخان السيليكا في مطحنة عالية الطاقة يحسن الخصائص الفيزيائية الرئيسية للمادة الرابطة الجديدة وخصائصها الميكانيكية قابلة للمقارنة مع مركبات الأسمنت البورتلاندي مع قوة أداء عالية تساوي 69.05 ميغا باسكال

**الكلمات المفتاحية:** المواد الإضافية الإسمنتية ، المواد الأسمنتية ، الأسمنت ، الكلنكر ، دخان السيليكا ، مركب بورتلاندي ، المقاومة ، الخواص الميكانيكية والفيزيائية ، البيئة ، المطحنة ، الطاقة

## **Abstract**

The trends of today's world are towards the search for more resistant and more efficient materials.

Supplementary cementitious materials are currently among the most recent developments in the production of cement, because their uses bring about an improvement in the mechanical properties of cementitious materials.

Thus, the use of heavy industry by-products which facilitates the low cost manufacture of various hydraulic binders.

On the other hand, their uses aim to reduce the consumption of clinker, contributing in a simple and economical way to solving problems related to the environment.

It is in this context that this study was conducted. It seeks to develop a new cementitious compound based on silica fume. The results show that the addition of 10% silica fume in a high-energy grinder improves the main physical properties of the new binder and its mechanical properties are comparable to Portland cement compounds with high performance strength equal to 69.05 MPa.

**Keywords:** Cementitious additives, Cementitious materials, Cement, Clinker, silica fume, Portland compound, Resistance, Mechanical and physical properties, Environment, Grinder, Energy

## NOMENCLATURE

<b>Symboles</b>	<b>signification</b>
$CaO$	<i>Chaux libre</i>
$SiO_2$	<i>silice</i>
$Al_2O_3$	<i>alumine</i>
$Fe_2O_3$	<i>hématite</i>
$C_3S$	<i>(CaO)3(SiO<sub>2</sub>)ouAlite</i>
$C_2S$	<i>CaO)2(SiO<sub>2</sub>);Belite</i>
$CaCO_3$	<i>Calcaire</i>
$C_4AF$	<i>(CaO)4(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Ferriteou aluminoferrite, on(CaO)2FeAlO<sub>3</sub></i>
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	<i>Gypse</i>

# Symboles & Abréviations

**CEM-I:** Ciment Portland

**CEM-II:** Ciment Portland composé

**CEM-III:** Ciment de haut fourneau

**CEM-IV:** Ciment pouzzolanique

**CEM-V:** Ciment composé

**L:** Calcaire

**S:** Laitier granulée

**SF, D :** la fumée de silice

**Z, P :** Pouzzolanes

**V, W :** Les cendres volantes

**T :** Schistes carbonisé

**LGHF :** Laitier granulé de haut fourneau

**TOC :** Total organique carbone

**CPA, PC :** Ciment portland

**HP :** Hauts performances

**BHP :** Béton de hautes performances

**HPC :** Ciment de hautes performances



# **Tables Des Matières**

# Tables Des Matières

---

## Table Des Matières

### Introduction

#### Chapitre I : Présentation de la cimenterie de MEFTAH

I.1	Présentation de la cimenterie de MEFTAH.....	4
I.2	Présentation .....	4
I.3	Principaux constructeurs .....	5
I.4	Date de Mise en service .....	5
I.5	Missions et Objectifs .....	5
I.6	Organisations .....	6
I.7	Localisation.....	7

#### Chapitre II : Synthèse Bibliographique

II.1	Histoire de la fabrication du ciment Portland.....	10
II.2	Processus de fabrication du ciment .....	12
II.3	Procédé de fabrication de l'unité.....	12
II.4	Broyage des Matières Premières .....	13
II.4.1	Réception et contrôle des matières premières .....	13
II.4.2	Le calcaire.....	13
II.5	Informations générales sur l'industrie du ciment .....	14
II.5.1	Définition du ciment .....	14
II.5.2	Processus de fabrication du ciment .....	14
II.6	Production du ciment.....	14
II.6.1	Extraction des matières premières .....	15
II.6.2	Concassage .....	15
II.6.3	Préparation du cru .....	16
II.6.4	Pré-homogénéisation.....	16
II.6.5	Broyage séchage .....	16
II.6.6	Séparation .....	17
II.6.7	Homogénéisation .....	17
II.6.8	La cuisson .....	17

## Tables Des Matières

---

II.6.9 Le préchauffage .....	19
II.6.10 Le pré-calciateur.....	19
II.6.11 Le four rotatif .....	20
II.6.12 Refroidissement .....	20
II.6.13 Broyage .....	21
II.6.14 Stockage, ensachage et expédition .....	21
II.6.15 Les transporteurs .....	21
II.7 Le Standard de chaux LSF.....	22
II.8 Le module silicique MS.....	22
II.9 Le module Alumino-ferrique MAF.....	22
II.10 Les différents types de liants hydraulique .....	23
II.11 Les cinq principales catégories de ciment .....	24
II.11.1 Le ciment Portland artificiel CEM-I.....	24
II.11.2 Composition chimique du Clinker .....	24
II.12 Le ciment Portland composé CEM-II.....	26
II.13 Les ajouts cimentaires .....	28
II.13.1 Introduction.....	28
II.13.2 Classification .....	28
II.14 Constituants principaux des ciments.....	29
a- Le laitier de haut fourneau .....	29
b- Les fumées de silices .....	30
c- Les cendres volantes .....	31
d- Schistes calcinés .....	32
e- Calcaires .....	32
f- La pouzzolane .....	32
II.15 Comportement d'un ciment avec ajout minéral .....	32
II.16 Facteurs influents sur la cinétique d'hydratation .....	34
II.17 Représentation de mécanisme de prise et du durcissement .....	35
II.18 Propriétés techniques de ciment Portland .....	38
II.18.1 La résistance mécanique .....	38

# Tables Des Matières

---

<b>II.18.2</b> La consistance normale.....	38
<b>II.18.3</b> Le retrait de gonflement .....	39
<b>II.19</b> La fumée de silice dans CEM-II.....	39
<b>Conclusion Chapitre II</b> .....	40
 <b>Chapitre III : Synthèse expérimentale « Matériel et Méthodes »</b>	
<b>III.1</b> Introduction.....	42
<b>III.2</b> Matériaux utilisés.....	42
<b>III.2.1</b> Concassage du clinker.....	42
<b>III.2.2</b> Broyage (broyeur à disque) .....	43
<b>III.2.3</b> Préparation des différents pourcentages à broyer .....	43
<b>III.3</b> Analyse Chimique.....	44
<b>III.3.1</b> Préparation des pastilles.....	44
<b>III.3.2</b> Mesure des refus par tamisage ALPINE.....	46
<b>III.3.3</b> Détermination de la chaux libre par acidimétrie.....	46
<b>III.3.4</b> Détermination de la perte au feu.....	48
<b>III.4</b> Analyse Physique.....	49
<b>III.4.1</b> Préparation des éprouvettes 4x4x16cm <sup>3</sup> .....	49
<b>III.4.1.1</b> Pesée des constituants.....	49
<b>III.4.1.2</b> Malaxage.....	49
<b>III.4.1.3</b> Moulage.....	50
<b>III.4.1.4</b> Conservation des éprouvettes dans l'eau.....	51
<b>III.4.2</b> La résistance mécanique.....	53
<b>III.4.3</b> Expansion.....	53

# Tables Des Matières

---

## Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1 Introduction.....	55
IV.2 Analyse chimique.....	55
IV.2.1 Effet du pourcentage d'ajout sur le pourcentage de refus.....	55
IV.2.2 Détermination de la chaux libre.....	57
IV.2.3 Pert eau feu.....	57
IV.3 Analyse physique.....	59
IV.3.1 Temps de prise.....	59
IV.3.2 Consistance.....	60
IV.3.3 La résistance mécanique.....	61

## Conclusion

## Liste Des Tableaux

---

### Liste Des Tableaux

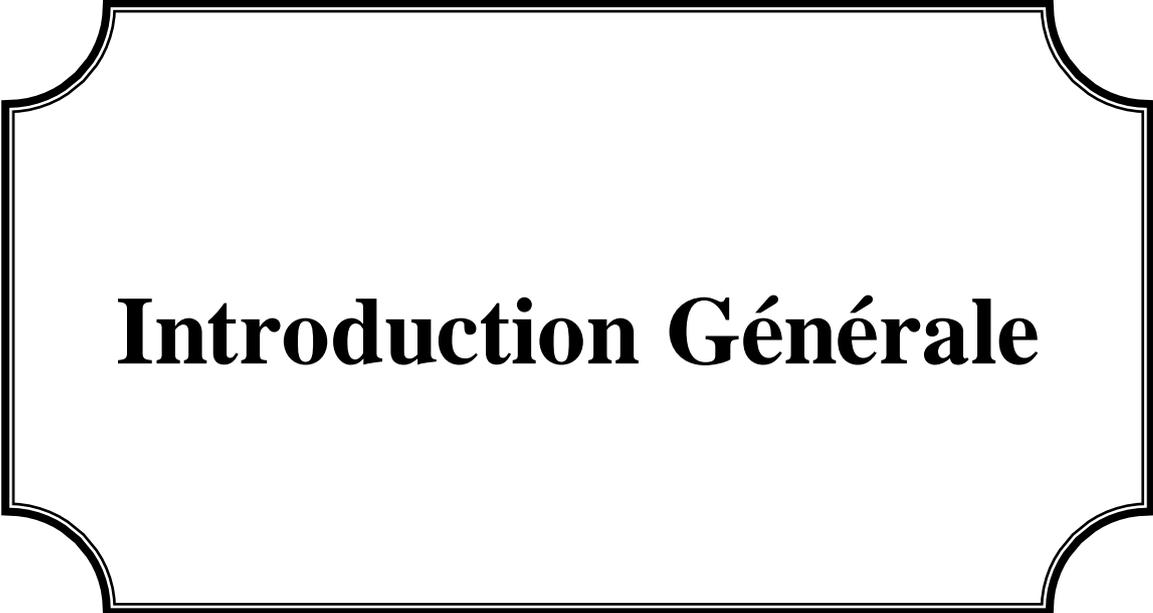
<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau II.1</b>	Teneurs moyennes des composants secondaires d'une farine	<b>22</b>
<b>Tableau II.2</b>	Les cinq principales catégories de ciment	<b>24</b>
<b>Tableau II.3</b>	Exemple de composition chimique d'un clinker	<b>25</b>
<b>Tableau II.4</b>	Les constituants et les additions du ciment	<b>27</b>
<b>Tableau III.5</b>	Programmes broyage matières	<b>43</b>
<b>Tableau III.6</b>	Résultats de % CAO des différents volumes $V_{HCl}$	<b>47</b>
<b>Tableau III.7</b>	Composition de mortier	<b>48</b>
<b>Tableau IV.1</b>	temps du broyage utilisé pour le différent pourcentage	<b>56</b>
<b>Tableau IV.2</b>	Pourcentage d'ajout (SF) en fonction le volume d'acide HCL(ml)	<b>57</b>
<b>Tableau IV.3</b>	les Résultats obtenus Par calcule de la PAF des différentes pourcentages	<b>58</b>
<b>Tableau IV.4</b>	les Résultats obtenus Par mesuré la stabilité (résistance) du ciment	<b>59</b>
<b>Tableau. IV.5</b>	début et fin de prise du différent pourcentage	<b>60</b>
<b>Tableau IV.6</b>	Variation début et fin de prise et la consistance normale des pourcentages	<b>61</b>

## Liste Des Figures

---

### Liste Des Figures

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Figure I.1</b>	Vue générale du site de la SCMI	<b>4</b>
<b>Figure I.2</b>	Organigramme de la SCMI	<b>6</b>
<b>Figure I.3</b>	Situation géographique de la SCMI	<b>7</b>
<b>Figure I.4</b>	Plan de circulation	<b>8</b>
<b>Figure II.1</b>	Schéma représentatifs sur processus de fabrication de ciment	
<b>Figure II.2</b>	Procédé de fabrication de ciment par voie sèche	<b>12</b>
<b>Figure II.3</b>	Four long rotatif en voie humide avec chaînes	<b>20</b>
<b>Figure II.4</b>	Cristaux anhydres du clinker	<b>25</b>
<b>Figure II.5</b>	Laitier granulé de haut fourneau vu au microscope	<b>29</b>
<b>Figure II.6</b>	Fumée de silice vu au microscope	<b>30</b>
<b>Figure II.7</b>	Cendre volante	<b>31</b>
<b>Figure II.8</b>	Hydratation du grain de ciment	<b>36</b>
<b>Figure II.9</b>	Les phases de l'hydratation	<b>37</b>
<b>Figure III.1</b>	l'appareil de concassage	<b>42</b>
<b>Figure III -14</b>	l'appareil de broyage	<b>43</b>
<b>Figure III -15</b>	la pastilleuse	<b>44</b>
<b>Figure III -16</b>	la Spectroscopie à fluorescence X 'XRF'	<b>45</b>
<b>Figure III -17</b>	l'appareil refus par tamisage ALPINE	<b>46</b>
<b>Figure III -18</b>	la burette de filtre digital et la pompe de filtration	<b>46</b>



# **Introduction Générale**

## Introduction Générale

Au monde de construction, le défi aujourd'hui est sur le besoin de trouver des nouveaux Liants toujours moins cher qui conduisent les industriels à produire divers ciments contenant le clinker des ajouts secondaires avec des proportions plus ou moins importants.

En Algérie ce sont principalement les laitiers de haute Fourneaux et les pouzzolanes qui sont utilisés comme ajout au ciment.

D'autres matériaux locaux peuvent être également utilisés et valoriser, c'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude.

Elle vise à élaborer un nouveau ciment composée à base de fumée de silice et en ayant une classe de résistance de ciment de haut performance.

Le premier test d'utilisation de fumée de silice dans le ciment (ciment Portland) date de 1952. Cet additif était alors coûteux et il a pris le nom de silice fumée, en tant que forme amorphe de silice produite par la combustion du tétrachlorure de silice dans une flamme très chaude (alimentée par un mélange d'hydrogène et oxygène pur). Ses propriétés hautement « pouzzolaniques » ont rapidement été confirmées mais ce produit était trop couteux pour présenter un intérêt pour les cimentiers. Puis à la fin des années 1960 sous la pression des premières lois environnementales, un déchet industriel issu de la production de silicium élémentaire ou d'alliages de Ferro-silicium dans des fours à arc électrique a été requalifié en sous-produit commercialisable et valorisable en fumée de silice pour les cimentiers, à des prix bien plus accessibles.

C'est sous-produits de l'industrie se trouvent relativement en abondance en Algérie et reste un peu utilisée ou recyclé jusqu'à présent.

Pour la fabrication du nouveau liant, la démarche adoptée consiste dans un premier temps à caractériser les matières premières utilisées et dans une seconde étape on cherchera à évaluer à partir d'un protocole expérimental détaillé les différentes performances chimiques, physiques et mécaniques du nouveau liant.

## **Introduction Générale**

---

Pour valider ses performances doivent impérativement répondre aux exigences imposées par les normes en vigueur en Algérie, et plus particulièrement la norme NA442.Réf qui impose des limites de composition destinées à garantir une cuisson convenable du clinker et l'obtention d'un produit sain.



**CHAPITRE 1**

## Chapitre I

### I.1 Présentation de la cimenterie de MEFTAH

La société des ciments de la Mitidja (S.C.MI) est une entreprise algérienne filiale de groupe industriel des ciments d'Algérie GICA. En partenariat avec Lafarge, depuis juin 2008, la SCMI enregistre d'ailleurs une production historique de 500 000 tonnes du ciment durant l'année 2011. Elle est spécialisée dans la fabrication et la commercialisation de ciment. Le réseau national de la SCMI lui permet de fournir ses produits sur tout le territoire national. La spécificité de son processus de fabrication procure à son ciment une excellente qualité respectant les normes internationales de fiabilité et de respect de l'environnement.

La cimenterie est implantée dans la commune de Meftah, daïra de Meftah, wilaya de Blida. L'unité est située à 27 kilomètres d'Alger, localisée à proximité de la route nationale n° 29 reliant la commune de Meftah à celle de Khemis-El-Khechna à l'Est et l'Arbaa à l'Ouest [1].



**Figure I.1 : Vue générale du site de la SCMI [01]**

### I.2 Présentation :

- **Raison sociale** : Société des Ciments de la Mitidja  
**Abréviation** : SCMI
- **Forme juridique** : Société Par Action (S.P.A)
- **Activité** : production et commercialisation des ciments ordinaires, spéciaux

# Chapitre I : Présentation de la cimenterie de MEFTAH

---

et tous autres matériaux de construction.

- **Capital social** : 1 400 000 000,00 DA

Détenu à **65%** par le groupe industriel des ciments d'Algérie -GICA- et à **35%** par le groupe LAFARGE

- **Effectifs** : 647 employés.

## I.3 Principaux constructeurs

- Kawasaki Heavy Industries LTD (K.H.I)
- Fives Cail Babcock (F.C.B)
- SNC (engineering) CANADA
- SNATPB (Génie civil) ALGERIE
- SIEMENS (Moteurs, Automatismes) RFA
- SN METAL (Charpente) ALGERIE
- FCB (Four) France

## I.4 Date de mise en service

- **Démarrage de l'usine** : 31 Janvier 1975
- **Allumage du four** : 06 Mai 1975
- **Production du ciment** : 01 Septembre 1975
- **Commercialisation du ciment** : 06 Novembre 1975
- **Date de création de la filiale** : 01 Janvier 1998
- **Entrée en partenaire avec groupe LAFARGE** : Septembre 2008

## I.5 Missions et objectifs

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

# Chapitre I : Présentation de la cimenterie de MEFTAH

néfastes. La capacité de production est située entre 0.8 et 1.2 million de tonnes /an.

Ses missions sont :

- Gérer et maintenir les moyens de production.
- Gérer les ressources humaines .Informer les informations comptables [02]

## I.6 Organisation

L'usine est organisée en un ensemble de départements et services techniques et administratifs.

Les premiers sont présidés par un directeur technique lie hiérarchiquement au président directeur générale, quant aux structures administratives, elles sont liées directement à la direction Chaque département a sa propre organisation, son mode de fonctionnement d'après ses objectifs dans l'organisme [01].

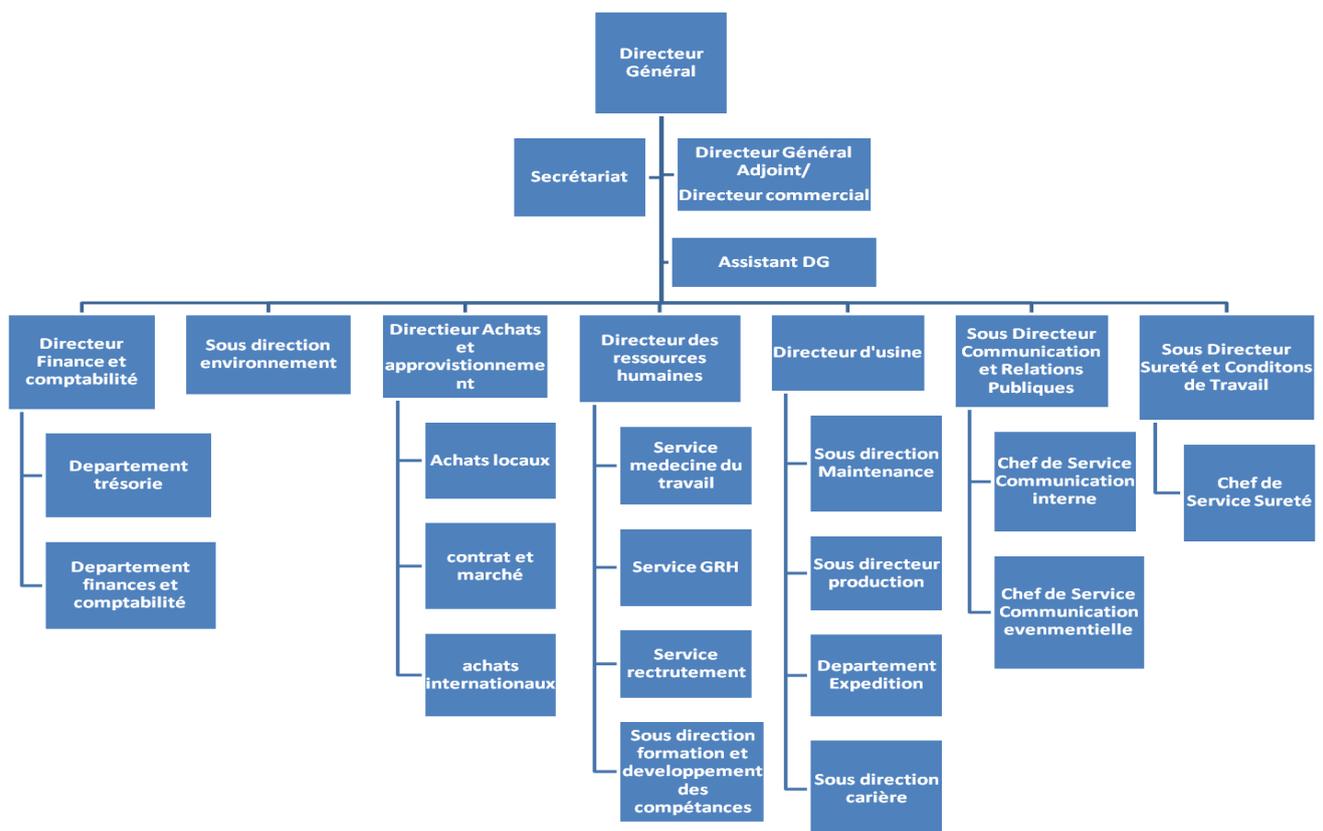


Figure I.2 : Organigramme de la SCMI [03]

# Chapitre I : Présentation de la cimenterie de MEFTAH

## I.7 Localisation

- La cimenterie de Meftah est localisée à proximité de la route nationale N°29, reliant la commune de Meftah à celle de Khemis-El-Khechna.
- Elle est implantée dans la commune de Meftah, Wilaya de Blida.
- Elle est située à une dizaine de kilomètre de la gare d'Oued-Smar et à une quinzaine de Kilomètre de l'aéroport international d'Alger.
- Elle est située à 27km au sud d'Alger. [01]

## Localisation

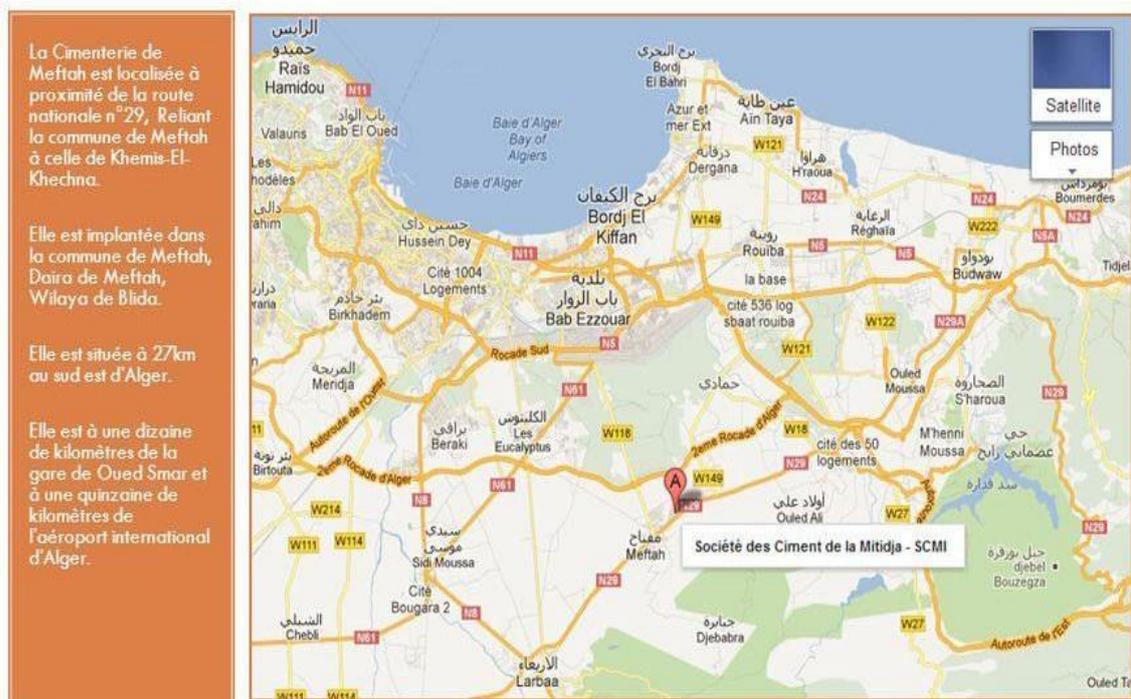
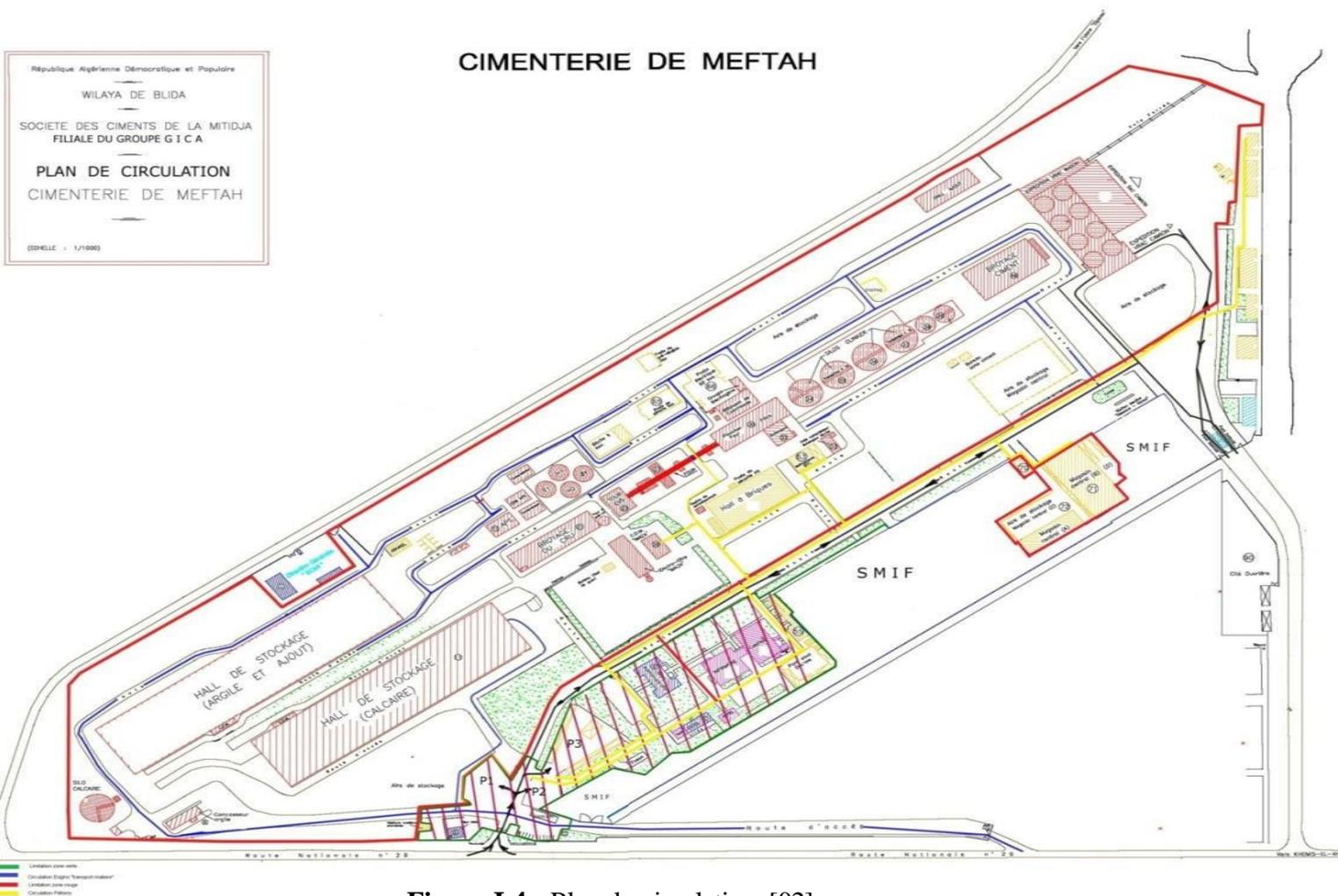


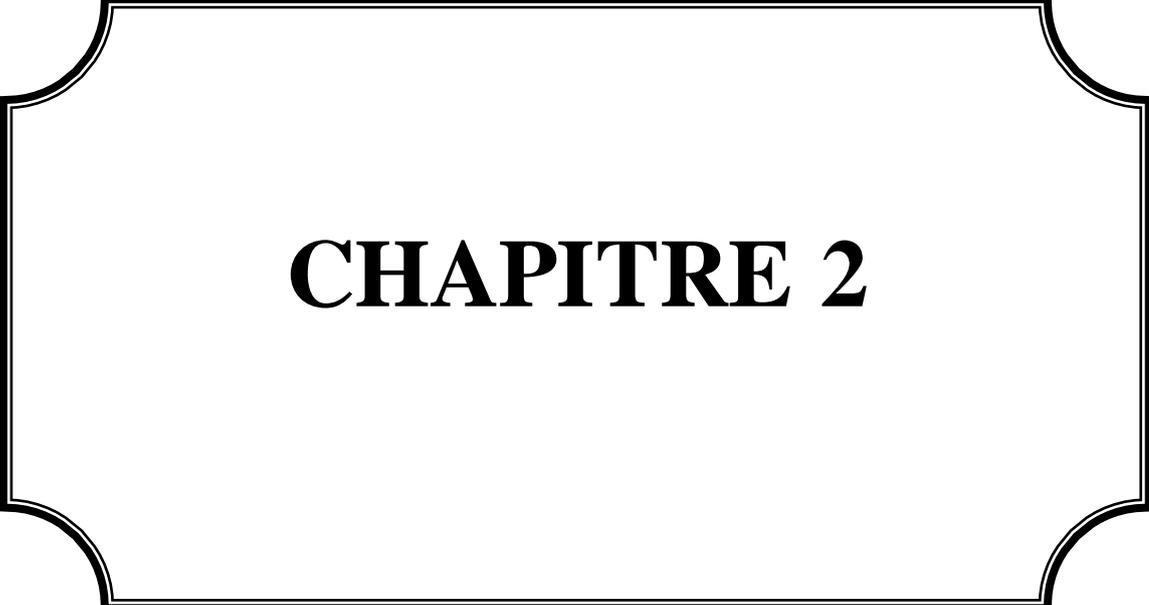
Figure I.3 : Situation géographique de la SCMI [01]

# Chapitre I : Présentation de la cimenterie de MEFTAH



La cimenterie s'étend sur une superficie globale de 14 hectares, répartie en deux principales zones :

- Une zone rouge, qui englobe la ligne de production.
  - Une zone verte, qui englobe les locaux administratifs.
- La distinction de la cimenterie en zone rouge et verte est basée sur des critères de sécurité du fait que l'accès à la ligne de production est conditionné par le respect des consignes de sécurité (EPI).
- La zone rouge est composée d'une carrière (un gisement de calcaire), une zone crue (pour le stockage des matières premières), une zone de cuisson, la zone ciment, la zone expédition et un centre de commandement (qui assure la gestion globale des zones)[02].



# **CHAPITRE 2**

### Chapitre II

#### Etude Bibliographique

##### II.1 Histoire de la fabrication du ciment Portland

Le ciment Portland est un ciment essentiel de silicate de calcium, qui est produit par cuisson à fusion partielle, à une température d'environ 1500 °C, mélange de calcaire ou de la craie (carbonate de calcium) et une quantité appropriée d'argile ou de schiste. La composition est généralement affinée par l'ajout de sable et / ou oxyde de fer.

Le premier ciment au silicate de calcium ont été produites par les Grecs et les Romains, qui ont découvert que les cendres volcaniques (volantes), finement broyées et mélangées avec de la chaux et de l'eau, produit un mortier qui durcit et résiste aux intempéries.

Cette réaction est connue sous le nom réaction pouzzolanique qui est à l'origine des performances mécaniques des bétons modernes composés par des matériaux comme les cendres volantes, la fumée de silice ou le métakaolin comme ajouts minéraux. Dans le milieu du XVIIIe siècle John Smeaton a découvert que certaines chaux qui avait des propriétés hydrauliques, car ils contenaient des silicates et des aluminates réactives, qui pourraient réagir avec l'eau pour donner des hydrates durables qui ont résisté à l'action de l'eau. Smeaton a utilisé ce matériau dans le mortier pour construire le phare Eddystone en 1759 (Angleterre).

Le terme «Ciment Portland » a été appliqué par Joseph Aspdin dans son brevet britannique N ° 5022 (1824), qui décrit un procédé de fabrication de pierres artificielles en mélangeant de la chaux avec de l'argile sous la forme d'une suspension et d'une calcination (chauffage pour chasser le dioxyde de carbone et l'eau).

Le terme «Portland» a été utilisé en raison de la similitude des produit durci à celle de pierre de Portland de Dorset et aussi parce que cette pierre a eu une excellente réputation de performances.

Joseph Aspdin n'était pas le premier à produire du ciment à base de silicate de calcium, mais son brevet lui a donné la priorité pour l'utilisation du terme «ciment Portland». D'autres travailleurs ont été actifs en même temps ou plus tôt, et plus particulièrement Louis Vicat en France [01]. Donne un aperçu exhaustif de l'histoire du développement du ciment calcaire (à base de chaux). Les ciments fabriqués dans la

## Chapitre II : Etude Bibliographique

---

première moitié du XIXe siècle n'ont pas eue la même composition que les ciments Portland moderne car la température – n'est pas assez haute pour obtenir le principal minéral des constituants des ciments modernes : silicate tricalcique. Le seul silicate bicalcique obtenu est le moins réactif des silicates (C2S), c'est l'introduction du four rotatif à la fin du XIXe siècle qui permis l'obtention d' un produit homogène, qui avait permis une température assez haute, suffisante pour assurer la formation de C3S.

Au cours du XXe siècle La nature du produit a relativement peu changé en termes de chimie générale et composition minérale, mais il ya eu des progrès considérables dans la technologie de production résultant à améliorer l'efficacité énergétique, le contrôle de la qualité et la réduction des impacts sur l'environnement.

Le contrôle de la composition du clinker a progressé, les proportions sont arrivées par essais et erreurs dans la fin du XIXe siècle à un contrôle précis à l'aide de spectroscopie à fluorescence X.

L'amélioration des méthodes de fabrication est continue et le contrôle de la qualité conjuguée à des pressions concurrentielles du marché n'ont donné lieu à une augmentation de la résistance à 28 jours donné par un ciment Portland européen typique à 28 jours depuis la fin du XIXe siècle .[02]

## Chapitre II : Etude Bibliographique

### II.2 Processus de fabrication du ciment :

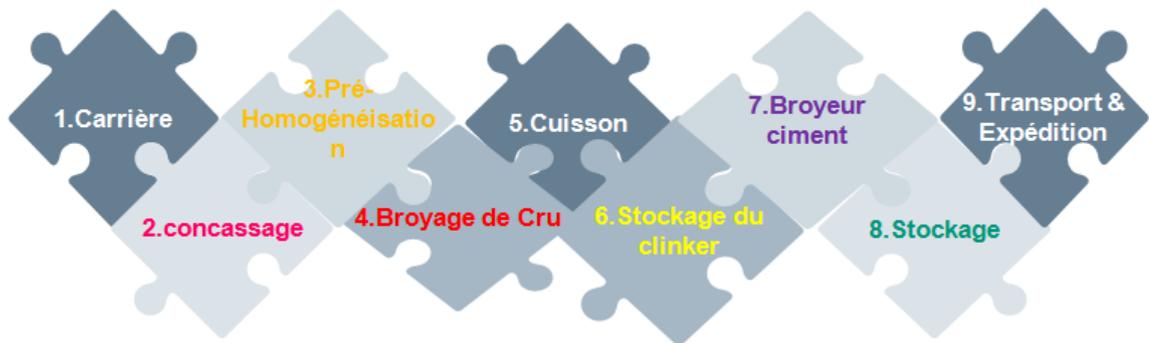


Figure II.1 : Schéma représentatifs sur processus de fabrication de ciment

### II.3 Procédé de fabrication de l'unité :

Les procédés de fabrication du ciment par voie sèche constituent à ce jour les modes d'élaboration du ciment les plus modernes et les plus performants. La fabrication du ciment par voie sèche passe par différentes étapes de transformations physico-chimiques, sous l'action d'importantes quantités d'énergie mécanique et thermique tel qu'illustré en (figure II.1). Comme son nom l'indique, ce procédé utilise une matière sèche où les étapes de séchage se déroulent à l'extérieur du système de cuisson. La récupération d'une grande partie des calories, contenues dans les gaz du four, et l'absence de déshydratation en font la méthode la moins vorace en consommation d'énergie thermique . Le progrès dans la mouture fine et l'homogénéisation des mélanges secs permet d'obtenir aujourd'hui des ciments de qualité [04].

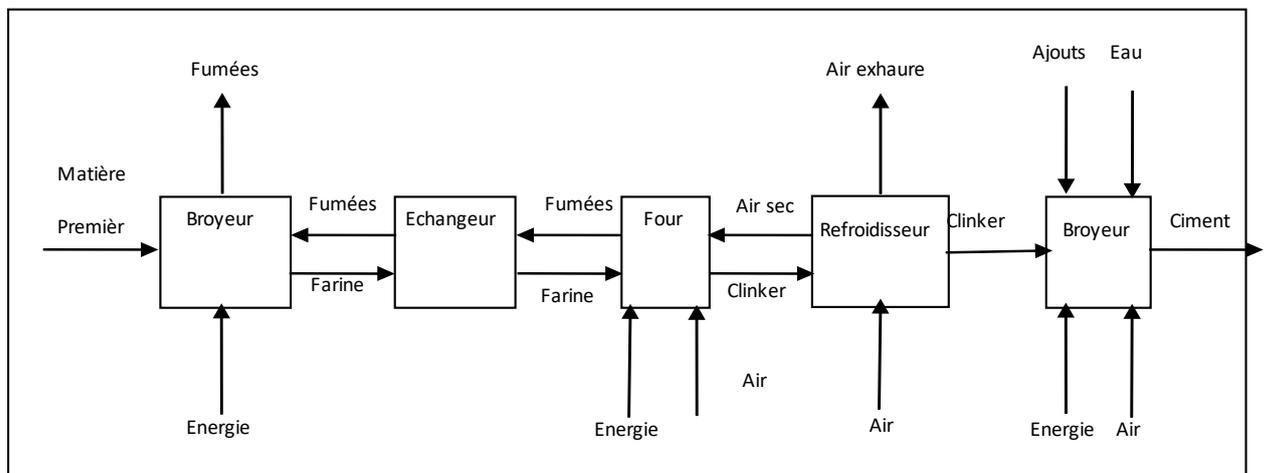


Figure II.2 : Procédé de fabrication de ciment par voie sèche [04].

## Chapitre II : Etude Bibliographique

---

L'étude relative à la localisation de n'importe quelle cimenterie revient à étudier l'existence des zones d'extraction du calcaire qui présente ainsi des réserves potentielles ayant une longue durée de vie.

L'importance de la SCMI réside dans sa particularité industrielle où elle figure parmi les rares unités de production qui maîtrisent l'intégralité du processus de production : de l'extraction de la matière première jusqu'à la commercialisation du produit aux clients finaux [04].

❖ **La composition du ciment est donnée comme suit :**

- le calcaire  $\text{CaCO}_3$  (80%)
- l'argile  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  (17%)
- le sable (2%)
- les minerais de fer (1%)

La fabrication du ciment passe par 06 étapes essentielles avant d'arriver à l'expédition.

### II.4 Broyage des matières premières

#### II.4.1 Réception et contrôle des matières premières

Les matières premières principales entrant dans la fabrication des ciments portlands sont constituées de calcaire, d'argiles, de sables, et de minerais de fer. D'autres matières premières sont considérées comme principales dans certaines cimenteries telles que le marne, le schiste, le laitier, la pouzzolane, le tuf, etc. Les contrôles de réception des matières premières acceptées sont souvent limités à la détermination d'une ou plusieurs caractéristiques de base du matériau (titre en carbonate d'un calcaire... etc) [03].

#### II.4.2 Le calcaire

Les calcaires sont constitués, principalement, de carbonate de calcium titrant au minimum 90% de  $\text{CaCO}_3$ , qui se présente sous forme de calcite ou d'aragonite. La calcite est la forme cristalline la plus stable et la plus courante de  $\text{CaCO}_3$ .

## **Chapitre II : Etude Bibliographique**

---

### **II.5 Informations générales sur l'industrie du ciment**

#### **II.5.1 Définition d'un ciment**

Le ciment est une poudre finement broyée, non métallique et inorganique qui, une fois mélangée avec une adjonction d'eau, forme une pâte qui prend et durcit. Ce durcissement hydraulique est principalement dû à la formation d'hydrates de silicates de calcium sous l'effet de la réaction entre l'eau du mélange et les constituants du ciment. Dans le cas des ciments alumineux, le durcissement hydraulique est dû à la formation d'hydrates d'aluminates de calcium. Les matières premières entrant dans la fabrication du clinker sont le calcaire et l'argile dans les proportions respectivement proches de 80% et 20%. Le calcaire apporte le calcium ; l'argile apporte la silice  $\text{SiO}_2$ , l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , et l'oxyde ferrique  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , nécessaire pour le processus de formation du clinker. Ces matières premières contiennent par ailleurs d'autres éléments que ces oxydes fondamentaux, tels que la magnésie  $\text{MgO}$ , des sulfates, des sulfures, des alcalis  $\text{K}_2\text{O}$ , et  $\text{Na}_2\text{O}$ ..., dans les pourcentages doivent être contenus en deçà de limites précises [05].

#### **II.5.2 Processus de fabrication de ciment**

Le ciment, matériau à la fois ancien et très largement utilisé, a l'image d'un produit banal et simple. Pourtant, derrière cette apparente banalité, se trouve un matériau très complexe, imparfaitement connu aussi bien du point de vue des réactions physico-chimiques à hautes températures qui se produisent lors de la fusion des matières premières au niveau du four, que lors des réactions d'hydratation pendant la prise ou plus tard lorsque le matériau acquiert des propriétés de résistances mécaniques énormes (de 30 à 50 Mpa 28 jours après l'hydratation).

### **II.6 Production du ciment**

Dans le procès du ciment le cru est obtenu après un processus de broyage et d'homogénéisation des matières premières, est transformé en clinker par traitement thermique. La transformation se réalise dans des fours rotatifs de grandes dimensions au sein des quels s'opère le traitement du cru vers  $1450^\circ\text{C}$ . Les réactions qui aboutissent à la formation du clinker nécessitent une importante consommation d'énergie. Aujourd'hui, la consommation calorifique nécessaire à la production de clinker est de l'ordre de 700 kcal/kg. Les plus grands fours rotatifs modernes autorisent aujourd'hui des productions atteignant 7800 tonnes de clinker par jour [06].

## Chapitre II : Etude Bibliographique

---

Les fours cimentiers sont composés de quatre parties principales qui sont

- un système de préchauffage du cru
- une partie pour la décarbonatation
- une partie pour la clinkérisation
- un refroidisseur

### II.6.1 Extraction des matières premières

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert par abattage à l'explosif de façon à la fragmenter en blocs, la roche est reprise par des dumpers vers un atelier de concassage. L'argile est une roche meuble elle est exploitée par excavation ou par pelle mécanique puis transportée par camion [06].

### II.6.2 Concassage

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

Pour choisir le type et les dimensions des machines, on tiendra compte de la nature et de la grosseur de la pierre, du degré de finesse désiré, et du rendement escompté. Généralement le concassage est utilisé pour concasser les roches du calcaire qui ont une dureté importante par rapport à la roche d'argile [06].

Les principaux types de concasseurs utilisés en cimenteries sont :

- Le concasseur à mâchoires qui convient bien aux matériaux durs même abrasifs mais non collants. Le rapport de réduction (le rapport entre la dimension des plus gros éléments existant avant et après la réduction) peut être de 8 à 10 dans les meilleurs cas.
- Le concasseur giratoire
- Le concasseur à cylindres dentés pour les matériaux humides très collants (rapport de réduction de 4 à 5).
- Le concasseur à marteaux pour les matériaux friables à mi-durs mais non abrasifs (teneur en silice inférieure à 5%). Le rapport de réduction peut être de 10 à 20) [07].

## Chapitre II : Etude Bibliographique

---

### II.6.3 Préparation du cru

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

- Dans la **voie sèche**, les matières premières broyées et séchées forment le cru ou farine qui a l'aspect d'une poudre fluide. Le cru est ensuite introduit dans le préchauffeur ou le précalcinateur du four.
- Dans la **voie semi-sèche**, la farine mélangée à de l'eau forme des granules qui sont introduits dans un préchauffeur à grilles situé en amont du four ou dans un four long équipé de croisillons.
- Dans la **voie semi-humide**, la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres-presses. Le gâteau de filtre-presse est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru.
- Dans la **voie humide**, les matières premières (dont la teneur en humidité est souvent élevée) sont broyées dans l'eau pour former une pâte pouvant être pompée. Elle est ensuite introduite directement dans le four où peut passer auparavant dans un sécheur [08].

### II.6.4 Pré homogénéisation

Cette phase qui a pour but de réaliser un mélange préliminaire, consiste à déposer les matériaux constitutifs du cru en couches successives, de faible épaisseur, formant le « tas de Pré homogénéisation » [08].

### II.6.5 broyage séchage

Les matières premières pré homogénéisées doivent être finement broyées pour être chimiquement plus réactives au cours de leur cuisson dans le four. Les réactions chimiques et les échanges thermiques sont en effet d'autant plus intenses, les surfaces des particules sont plus grandes. Les meilleurs clinkers sont obtenus à partir de la mouture plus fine.

Dans les installations récentes, On sèche le cru presque uniquement dans le groupe broyeur, en même temps que s'effectue le broyage. Ces installations fonctionnent avec séparateurs à air et broyeurs - sécheurs [08].

## Chapitre II : Etude Bibliographique

---

Le broyage - séchage est très avantageux au point de vue calorifique, car les gaz chauds enveloppent complètement les particules fines, et leur transmettent rapidement leur chaleur. Le degré d'humidité de la matière et la température du gaz ; déterminent la quantité de gaz chaude, qu'il faut apporter à l'installation pour éliminer l'eau du cru. La vapeur d'eau produite est évacuée du groupe – broyeur par élimination d'une quantité voulue du mélange air- vapeur d'eau produit.

Cette quantité doit être suffisamment abondante pour éviter toute condensation. Les broyeurs à cru assurent les séchages des matériaux et leur broyage jusqu'à l'obtention d'une farine cru ayant un refus au tamis de 160 µm de l'ordre de (1 – 1.5%) [09].

### II.6.6 Séparation

Cette phase consiste, suivant le type de séparateur utilisé, à envoyer au broyeur les particules insuffisamment broyées et à récupérer les fines contenues dans les gaz [08].

### II.6.7 Homogénéisation

C'est au cours de cette phase que grâce à un brassage pneumatique ou mécanique vigoureux, peut être obtenu un produit parfaitement homogène, de caractéristiques chimiques uniformes, apte à être cuit. [08]

### II.6.8 La cuisson (Installation de cuisson)

Le four rotatif est l'élément principal de l'installation de fabrication du clinker. Il est essentiellement constitué par un tube cylindrique dans lequel brûlent des substances combustibles injectées à fort débit en produisant une flamme de plusieurs dizaines de mètres de longueur. [08]

Il fonctionne comme un échangeur de chaleur à contre-courant dans lequel la flamme, dirigée de l'aval vers l'amont, porte à hautes températures le cru qui progresse en sens inverse, le tube étant incliné vers l'aval de 3 à 4%.

De tels fours ont une longueur de 30 à 100 mètres et un diamètre de 2 à 6 mètres.

Pour améliorer le rendement thermique mais aussi pour utiliser la chaleur produite par la flamme, les gaz de cuisson qui sortent du four sont utilisés dans l'installation pour préchauffer le cru disposé à l'entrée du four. Ces échanges thermiques sont réalisés dans un système de cyclones séparateurs et de gaines.

A l'issue de cette étape de préchauffage, on emploie des foyers de précalcination qui font passer les matières premières vers 800 à 900°C. Le cru se décarbonate alors

## Chapitre II : Etude Bibliographique

---

(entraînant une consommation énergétique de l'ordre de 400 kcal/kg), ce qui facilite l'étape de clinkérisation vers 1450°C au niveau du four rotatif. [08]

A l'aval du four, le clinker sort à une température comprise entre 1200 et 1450°C et tombe dans le refroidisseur. Cette trempe rapide du clinker fige les phases formées (silicates et aluminates de calcium) à hautes températures.

Le clinker refroidi se présente alors sous forme de granules. Le ciment est obtenu par broyage des granules de clinker, avec addition d'environ 5 % de gypse et éventuellement d'autres constituants. Les opérations de broyage du clinker ont pour but d'accroître sa réactivité par augmentation de sa surface spécifique (et par création de défauts de cristaux en surface des grains). L'opération de broyage du clinker est effectuée dans de grands broyeurs cylindriques à boulets (broyeurs les plus généralement utilisés).

La farine crue obtenue à l'issue du processus de broyage et d'homogénéisation de matières premières est transformée en clinker par traitement thermique.

Les fours de cuisson du ciment comportent toujours :

- un système de préchauffage du cru.
- Une zone de décarbonatation.
- Zone de clinkérisation.
- Zone de refroidissement.

La matière passe par les stades thermiques successifs suivants :

- Préchauffage :  $\leq 500^{\circ}\text{C}$ .
- Décomposition des argiles  $> 500^{\circ}\text{C}$ .
- Décarbonatation des calcaires : de 500 à 1050°C.
- Clinkérisation de 1200 à 1450°C.
- Refroidissement de 1450 à 80°C.

Selon le procédé de voie sèche l'installation de cuisson se compose de deux parties :

- Une partie fixe : le préchauffeur.
- Une partie mobile : le four.

Les fours rotatifs sont les plus répandus.

Les dispositions et les conditions de fonctionnement d'un four dépendent du mode de fabrication adopté (sec ou humide) [09].

## **Chapitre II : Etude Bibliographique**

---

### **II.6.9 Le préchauffage**

Le préchauffeur est un échangeur de chaleur dans lequel les transferts thermiques s'effectuent par contact entre la matière et les gaz dans un système de cyclones séparateurs et de gaines où se font les échanges.

La farine crue est introduite dans la partie lente du four et descend par gravité du cyclone supérieur vers le cyclone inférieur par un conduit de diamètre réduit.

La farine entre dans le four à  $T = 600$  à  $800^{\circ}\text{C}$ , elle atteint l'entrée du four en 30 à 60 secondes et sera réchauffée à environ  $850^{\circ}\text{C}$  [09].

### **II.6.10 Le pré calcinateur**

La calcination est la phase la plus vorace d'énergie, elle exige 60% de la consommation du combustible et la moitié du four.

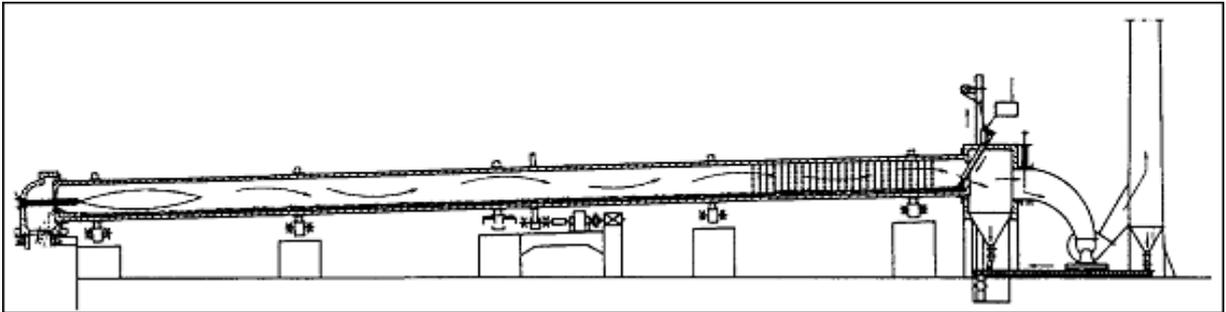
Le pré calcinateur permet de sortir environ 95% du processus hors du four, donc d'en réduire la longueur, ou bien augmenter la capacité de production [09].

## Chapitre II : Etude Bibliographique

### II.6.11 Le four Rotatif

Il est constitué par un tube cylindrique incliné de 3 à 5% et de 2 à 6 m de diamètre et de 60 à 180 m de longueur.

Ce cylindre de 15 à 30 mm d'épaisseur est garni intérieurement d'un matériau réfractaire qui assure sa protection vis-à-vis des hautes températures régnantes à l'intérieur de l'appareil. (Voir figure II.3).



**Figure II.3 :** Four long rotatif en voie humide avec chaînes [11].

Les fours de petit diamètre sont plus inclinés que les fours de grand diamètre. La matière crue est introduite dans le four à la partie supérieure, et le chauffage s'effectue à l'autre extrémité, si bien que ces fours travaillent à contre-courant. Comme combustible on utilise du charbon pulvérisé, du mazout ou du gaz, sa vitesse de rotation est 1.5 à 3.5t/min.

Le transit de la matière s'effectue en 30-60min, le revêtement réfractaire pour la protection du four, elle doit avoir une certaine affinité avec le clinker, c'est-à-dire que la fusion doit constituer une croûte de protection du revêtement, dans le cas contraire, le revêtement serait endommagé localement [11].

### II.6.12 Refroidissement

Les refroidisseurs doivent en outre fournir un air secondaire bien réchauffée pour le four. Le clinker sortant du four avec une température de 1200 – 1300°C nécessite un refroidissement qui permet de le transporter d'une part et d'autre part la récupération un maximum de chaleur qu'il en magasiné.

Cette récupération réduit sensiblement la consommation spécifique de chaleur nécessaire à la production du clinker par apport thermique.

1. à l'air de combustible du four (air secondaire).
2. du pré-calciateur (air tertiaire).
3. à l'air utilisé dans le broyeur -sècheur du cru.

## Chapitre II : Etude Bibliographique

---

Le régime du refroidissement influé positivement ou négativement sur la composition minéralogique et même les propriétés physique et chimique du clinker obtenu.

De plus le refroidissement est une opération importante vis-à-vis de la quantité du clinker.

Un refroidissement brusque permet de maintenir le  $C_3S$  dans un état métastable, alors qu'un refroidissement lent conduit à la transformation du  $C_3S$  en  $C_2S + CaO$  et  $C_2S$  les moins hydraulique. On distingue plusieurs types de refroidisseurs : refroidisseur rotatif, refroidisseur Fuller à grille [12].

### II.6.13 Broyage

Il est réalisé en continu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts. Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granules de clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse (dont le rôle est de réguler le phénomène de prise), ainsi qu'à celui des éventuels autres constituants (laitier, cendres...), ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés [12].

### II.6.14 Stockage, ensachage et expédition

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac. L'ensachage, qui dans les pays industrialisés ne représente qu'environ 30% de la production de ciment, s'effectue dans des sacs en papier kraft à l'aide de machines capables de remplir de 2000 à 4000 sacs par heure.

La livraison en vrac est assurée par camions, wagons ou péniches [12].

### II.6.15 Les transporteurs

Le déplacement de la matière d'une installation à l'autre s'effectue à l'aide des transporteurs spécifique, chacun a son propre rôle on peut distinguer : transporteur mécanique, transporteur à bande, transporteur à vis sans fin, élévateur à godés, transporteur pneumatique. [12]. La qualité de la constitution de ce mélange cru peut être caractérisée par différents indices ou modules tels que : le standard de chaux et les modules silicique et alumino-ferrique.

## Chapitre II : Etude Bibliographique

### II.7 Le standard de chaux LSF :

Indique le pouvoir liant CaO aux autres composants. Pour obtenir la saturation des oxydes, plusieurs formules ont été proposées, afin de déterminer la teneur en chaux nécessaire et pour obtenir des résultats sensiblement équivalents. Le coefficient de LSF [2] dit facteur de saturation est généralement retenu [13] .

$$LSF = \frac{CaO}{2,8 SiO_2 + 1,18 Al_2O_3 + 0,65 Fe_2O_3} = 96,5$$

### II.8 Le module silicique MS :

Pour faciliter les réactions de clinkerisation, une phase liquide doit exister pendant une des étapes de la cuisson. Une relation entre les proportions de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doit être respectée. [14]

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} = 2,40$$

### II.9 Le module alumino-ferrique MAF :

Le module alumino-ferrique conditionne la viscosité de la phase liquide, qui est une caractéristique importante pour les réactions mises en jeu dans le four, en particulier la fusion de la matière. [15] Ce module est donné par :

$$MAF = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} = 1,60$$

Les composants secondaires de la farine crue peuvent influencer la qualité du clinker, leur dosage ne doit pas être négligé. De ce fait, les normes de qualité de clinker imposent une limite supérieure de ces constituants. Des exemples de teneurs moyennes d'une farine crue industrielle sont cités dans le tableau II.1

**Tableau II.1** Teneurs moyennes des composants secondaires d'une farine [15]

Element	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>3</sub>	MgO
Teneur (%)	0,5 – 1,3	0,05 -0,5	0,01- 0,02	0,1 – 0,5	< 2

## Chapitre II : Etude Bibliographique

---

### II.10 Les différents types de liant hydraulique :

Un liant hydraulique est une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Il s'agit d'un mélange d'un ou plusieurs constituants qui présentent l'une ou plusieurs des propriétés suivantes:

- des propriétés hydrauliques, ils forment par réaction avec de l'eau des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau ;
- des propriétés pouzzolaniques, ils ont la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec la chaux, des composés hydratés stables ;
- des propriétés physiques qui améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution du ressuage...)

Les liants hydrauliques courants sont subdivisés selon la normalisation en vigueur en cinq types en fonction de leur composition :

- CEM I : ciment Portland ;
- CEM II : ciment Portland composé ;
- CEM III : ciment de haut-fourneau ;
- CEM IV : ciment pouzzolanique ;
- CEM V : ciment composé [07].

## Chapitre II : Etude Bibliographique

### II.11 Les cinq principales catégories de ciment conformément à la norme SIA 215.002

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

**Tableau II.2 : Les cinq principales catégories de ciment [07]**

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
CEM II	Ciment Portland compose	65-94	6-35	Calcaire (L), laitier granulé(S), fumées de silice (D, max. 10 %), pouzzolanes (P, Q), cendres volantes (V, W) ou schiste 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
CEM V	Ciment compose	20-64	36-80	Laitier granulé et pouzzolanes et/ou cendres volantes	0-5

La technologie de fabrication des ciments propose plusieurs procédés qui sont nécessaires au traitement des mélanges crus afin d'obtenir un produit fini appelé le clinker. Ces procédés sont utilisés d'une manière successive à savoir :

Extraction, Concassage, broyage, séchage ou préchauffage, cuisson, refroidissement, transport du matériau. [07]

#### II.11.1 Le ciment portland artificiel (CEM I) :

C'est le produit résultant de la mouture de clinker, obtenu par la cuisson, dans des conditions de durée et de températures suffisantes, d'un mélange soigneusement homogénéisé et dosé, dont les principaux constituants sont : La silice, l'alumine, l'oxyde de fer et la chaux [15].

#### II.11.2 Composition chimique du clinker :

De fait, la chimie des ciments est essentiellement une chimie des oxydes

Le Tableau II.3 présente un exemple de composition chimique d'un clinker [16].

## Chapitre II : Etude Bibliographique

Tableau II.3 : Exemple de composition chimique d'un clinker [16].

Oxydes	Notations	Pourcentages	Marge d'erreur
Perte au feu	-	1.08	$\pm 0.05$
SiO <sub>2</sub>	S	21.1	$\pm 0.1$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	5.11	$\pm 0.05$
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	3.331	$\pm 0.05$
TiO <sub>2</sub>	-	0.21	$\pm 0.01$
MnO	-	0.04	$\pm 0.01$
CaO	C	65.5	$\pm 0.2$
MgO	M	1.31	$\pm 0.03$
SO <sub>3</sub>	Ŝ	0.93	$\pm 0.02$
K <sub>2</sub> O	K	1.02	$\pm 0.02$
Na <sub>2</sub> O	N	0.21	$\pm 0.02$
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.04	$\pm 0.01$
SrO	-	0.08	$\pm 0.01$

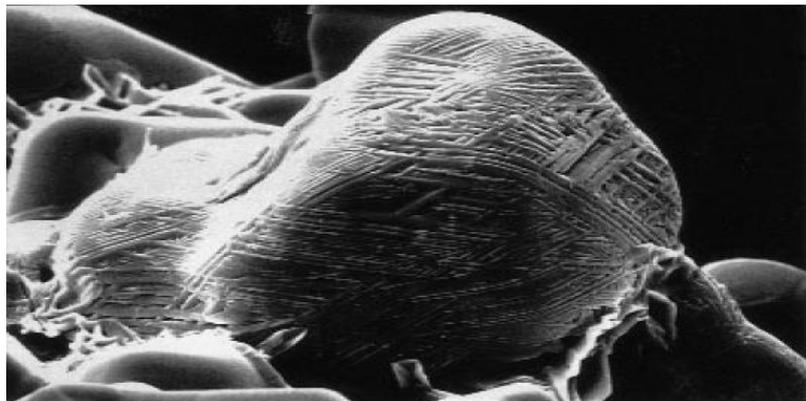


Figure. II.4 : Cristaux anhydres du clinker. [17]

### II.12 Le ciment portland composé (CEM II)

Les ciments portland composés contiennent au moins 65% de clinker, 5% de constituant secondaires, et des ajouts avec 30%. On a, par convention :

$$(\text{Clinker}) + (\text{autres constituants}) + (\text{constituants secondaires}) = 100.$$

Le ciment est le résultat du broyage d'un certain nombre de constituants qui peuvent se répartir en différentes familles :

- Le clinker Portland.
- Le régulateur de prise.
- Les additions.
- Les additions hydrauliques.
- Les additions pouzzolaniques.
- Les fillers inertes.

Suivant sa composition chimique il aura des propriétés différentes. Le clinker réagit avec l'eau pour développer son potentiel hydraulique. Ces réactions doivent être tempérées par le régulateur de prise, généralement un sulfate de calcium (gypse ou anhydrite). Des additions sont parfois utilisées pour des raisons économiques, pour leur potentiel hydraulique latent, ou pouzzolanique (naturelle ou artificielle).

## Chapitre II : Etude Bibliographique

**Tableau II.4** Les constituants et les additions du ciment [18].

Ciment Portland		Les additions			
Clinker	Régulateur de prise	Hydraulique	Pouzzolane	Inerte	Additifs
	Gypse Anhydrite	Laitier de haut fourneau, Cendres volantes de lignite	Cendres volantes, Argile calciné , Fumée de silice	Filler calcaire ou silicieux	Agent de broyage, Adjuvants

La fabrication de ciment à teneur réduite en clinker, implique l'utilisation des composants minéraux peu coûteux permettant d'économiser le combustible énergétique lors de la fabrication, et de limiter ainsi l'émission de gaz carbonique dans l'atmosphère environnante.

Une augmentation de la production de ce type de ciment à faible teneur en clinker requiert cependant une étude systématique des différents composants entrant dans la composition des liants.

Ainsi, la nature et la quantité des ajouts minéraux peuvent modifier les processus d'hydratation et les hydrates formés. De même, les propriétés mécaniques et la durabilité des composés obtenus [18].

### II.13 LES AJOUTS CIMENTAIRES

#### II.13.1.Introduction

Les ajouts cimentaires sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment Portland et donnent ses propriétés au béton, grâce à une activité hydraulique et/ou pouzzolanique. Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques. Des ajouts, tels que les cendres volantes, la pouzzolane, le laitier granulé de haut fourneau (LGHF), les fumées de silice et les fillers entrent dans la majorité des compositions du ciment dans le but d'améliorer ses caractéristiques rhéologiques et/ou mécaniques. On obtient ainsi un liant de composition binaire ou ternaire. Les pays industrialisés tels que les États-Unis, la Russie, la France, l'Allemagne, le Japon et l'Angleterre, sont les plus grands producteurs de cendres volantes, de fumée de silice et de laitier de haut fourneau. La Chine et l'Inde produisent également des quantités importantes de cendres de balles de riz. [21]

Selon la norme NF EN 206-1. Une addition (ajout) est un matériau minéral finement divisé et pouvant être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés, ou pour lui conférer des propriétés particulières. Les additions peuvent être utilisées : soit en substitution partielle au ciment de type CEM I pour constituer un liant équivalent conformément aux spécifications de la norme NF EN 206-1, soit incorporé au béton sans substitution du ciment.

#### II.13.2 CLASSIFICATION DES AJOUTS

Les ajouts peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs. Les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de fillers. Une classification normalisée dans un contexte de leur utilisation dans l'industrie cimentaire qui prime l'aspect fonctionnel des ajouts, selon la norme NF EN 206-1, il existe deux types d'additions, par ailleurs, le cadre normatif français propose six matériaux répondant à la définition « additions pour béton hydraulique » à savoir :

- Les additions quasiment inertes (type I) selon la norme EN 206-1
  - Les additions calcaires (NF P 18-508)
  - Les additions siliceuses (NF P 18-509)
  - Les fillers (NF P 18-501)
- les pouzzolanes ou les additions à caractère hydraulique latent (type II)

## Chapitre II : Etude Bibliographique

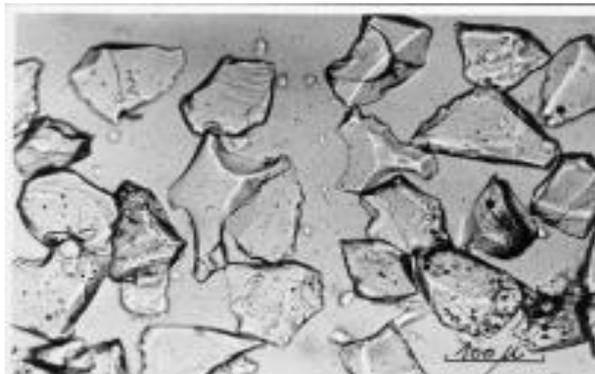
---

- La fumée de silice (NF P 18-502)
- Les cendres volantes (NF P 18-505)
- Le laitier vitrifié moulé de haut fourneau (NF P 18-506)

### II.14 Constituants principaux des ciments :

Associés au clinker, les autres constituants modifient les propriétés du ciment grâce à leurs caractéristiques chimiques et physiques. On appelle « constituant principal », un constituant entrant dans la composition du ciment dans une proportion excédant 5% en masse.

#### a) Le laitier de haut fourneau (S) :



**Figure. II.5:** Laitier granulé de haut fourneau vu au microscope [23].

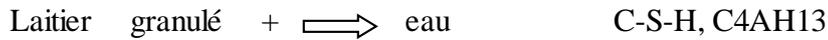
Le laitier est un sous-produit de la transformation du minerai de fer dans un haut fourneau en fer plus pur. Durant cette transformation, le laitier en fusion flotte sur la fonte en fusion et est granulé au cours d'un refroidissement rapide par trempe dans de l'eau ou par un procédé de pelletisation, pour produire un matériau vitreux s'apparentant à du sable et qui est caractérisé par une réactivité hydraulique. Ce matériau est ensuite broyé à une finesse de moins de 45  $\mu\text{m}$  pour former du laitier granulé de haut fourneau (LGHF), également appelé ciment de laitier, ou est utilisé comme ingrédient dans la fabrication de ciments composés.

En présence d'eau et d'un activateur, l'hydroxyde alcalin (du NaOH ou du KOH) ou du  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , fourni par le ciment Portland, le laitier granulé 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. [18]

## Chapitre II : Etude Bibliographique

Pour faire prise ,le laitier doit subir une activation calcique,sulfatique ou sulfo- calcique,ou par des alcalins. Deux exemples de réaction d'hydratation et d'activation du laitier sont donnés si après :

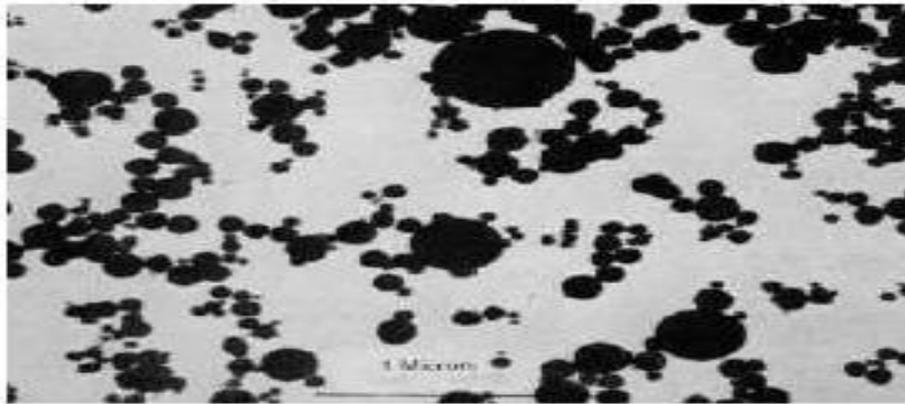
### Chaux (activation)



### Ciment portland (activation)

Laitier granulé + eau  $\longrightarrow$  C-S-H, Ettringite  $[3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}]$  ; Monosulfoaluminate de calcium hydraté  $[\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}]$  ;Hydrogrenat  $[\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO} \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$  ;Hydrotalcite  $[\text{Mg}_6\text{Al}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_{16} \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$  [24 ]

### b) Les fumées de silice (D) :



**Figure. II.6:** Fumée de silice vu au microscope [18].

Les fumées de silice sont un sous-produit de la fabrication du silicium ou de différents alliages de ferrosilicium . 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°C.

Les fumées de silice se présentent sous forme de fines particules sphériques d'un diamètre moyen d'environ 0,1  $\mu\text{m}$ . Leur surface spécifique est de 20  $\text{m}^2/\text{g}$  à 25  $\text{m}^2/\text{g}$ .

La finesse et la forme vitreuse des fumées de silice font d'elles un produit très réactif. Leur teneur en silice vitreuse varie de 75 % à 95%.

Les fumées de silice présentent des propriétés pouzzolaniques en raison de leur forte teneur en silice amorphe. 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. [25]

## Chapitre II : Etude Bibliographique

La fumée de silice (silica, silica fume) est une poussière très fine avec un effet fortement pouzzolanique, utilisée en qualité d'ajout et de stabilisateur. Qu'on l'appelle microsilia, fumée de silice condensée ou plus régulièrement fumée de silice, tous ces termes représentent la même pouzzolane [18]. Si la proportion de fumées de silice dans le ciment excède 3 % en masse, seules les fumées de silice satisfaisantes aux spécifications suivantes doivent être utilisées:

- silice amorphe ( $\text{SiO}_2$ )  $\geq 85$  % en masse ;
- perte au feu  $\leq 4$  % en masse ;
- aire massique (non traitée)  $\geq 15 \text{ m}^2/\text{g}$ . [20]

### c) Les cendres volantes (V ou W) :

Ce sont des produits pulvérulents de grande finesse résultant de la combustion en centrale thermique des combustibles minéraux solides (houille, lignite...) ; elles rentrent dans la composition de certains ciments en proportion variable (5 à 20%) ; on les ajoute au moment du broyage du clinker [23].

Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et phasiques dépendant des impuretés contenues dans le charbon utilisé. Du point de vue minéralogique les cendres volantes se divisent en deux catégories, qui diffèrent l'une de l'autre par leur teneur en CaO (ASTM C 618-94a). [26]

On distingue :

- 1- **Classe F** : contenant moins de 10% de CaO produit de la combustion de l'antracite et du charbon bitumineux
- 2- **Classe C** : contenant entre 15 % et 35% de CaO produit de la combustion de la lignite.[27]

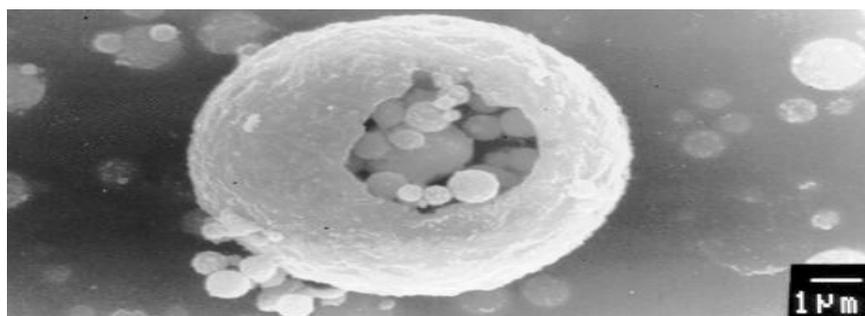


Figure. 1.7. Cendre volante [23].

## Chapitre II : Etude Bibliographique

---

Les particules de cendres volantes se présentent sous forme de petites sphères de diamètre allant de 1  $\mu\text{m}$  à 100  $\mu\text{m}$  (50 % < 20  $\mu\text{m}$ ). La forme et la granulométrie des cendres volantes ont un effet important sur l'ouvrabilité et la demande en eau des bétons frais.

### d) Schistes calcinés (T) :

Ces produits, obtenus à des température de l'ordre de 800°C, présentent, outre leurs propriétés pouzzolaniques, des propriétés hydrauliques lorsqu'ils sont finement broyés.[25]

### e) Calcaires (L) :

Pour pouvoir être considérés comme un constituant principal du ciment, les calcaires doivent être composés de 75% au moins de  $\text{CaCO}_3$  [18]. Et dont la teneur en TOC(Total OrganicCarbon) est limitée :

Si ce TOC est < 0.20 % désignation abrégée : LL Si ce TOC est < 0.50 % désignation abrégée : L

Un béton confectionné avec un ciment contenant des proportions élevées en calcaire à haute Teneur en TOC risque de ne pas accuser une haute résistance au gel-dégel [18].

### f) La pouzzolane (Z) :

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ceux 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 [27].

## II.15 Comportement d'un ciment avec ajout minéral

Le comportement du ciment avec ajout minéral est déterminé par trois caractéristiques de la réaction pouzzolanique de l'ajout.

- ✓ La réaction est lente, le dégagement de chaleur et le développement desrésistances seront également lents.
- ✓ Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réactionpouzzolanique en consomme et améliore la résistance du béton en milieu acide.

## Chapitre II : Etude Bibliographique

---

Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons par affinage de ces pores capillaires et par transformation des gros cristaux de CH en un produit d'hydratation faiblement cristallisé (affinage des grains).

Les substances hydrauliques latentes contiennent moins d'oxyde de calcium que le ciment Portland et ne réagissent de ce fait pas avec l'eau. Dans cette procédure, l'hydroxyde de calcium intervient en qualité d'activateur et non de partenaire réactif.

Les substances pouzzolaniques contiennent encore moins, voire pas d'oxyde de calcium. L'hydroxyde de calcium issu de l'hydratation du ciment Portland n'intervient pas, par conséquent, uniquement en qualité d'activateur, mais il est nécessaire en tant que réactif.

Les substances pouzzolaniques peuvent réagir fortement, moyennement ou faiblement contribuant ainsi plus ou moins à la résistance et à l'étanchéité du béton.

La fumée de silice représente dans ce groupe l'activité la plus importante, parce qu'elle possède la plus faible part cristalline et la plus grande surface spécifique. Les substances inertes ne réagissent pas avec les composants du ciment. La substance inerte la plus importante est la poudre de chaux, utilisée comme substitut de matériaux fins.

L'adjonction de fibres améliore le comportement à la rupture du béton.

Les ajouts présentent une activité liante croissante avec leur quantité, leur finesse, leur composition minéralogique et le type de ciment influe également.

En termes pratiques, cette activité liante se traduit par un gain de résistance.

Notons que la finesse favorise l'effet physico-chimique des ajouts. En effet, la présence d'un grand nombre de particules submicroniques dans la matrice cimentaire autour des grains de ciment multiplie les possibilités de germination des produits hydratés et développe la complexité microstructurale et l'efficacité des liaisons [28].

### II.16 Facteurs influents sur la cinétique d'hydratation

#### a) La classe du ciment

Elle caractérise la résistance à la compression du ciment, mesurée à 28 jours. Elle dépend de la rapidité d'hydratation et de la structuration de la pâte du ciment. Elle fait intervenir la composition minéralogique du ciment, la finesse de broyage et le gypsage. Un CPA broyé à une SSB de 5000, offre une plus grande résistance à la compression qu'un CPA identique broyé à 3500 (respectivement 50 et 40 MPa) à 28 jours.

## Chapitre II : Etude Bibliographique

---

Son hydratation est en fait, plus rapide parce qu'elle présente une plus grande surface libre à l'action de l'eau.

Les grains  $> 30 \mu$  ne s'hydratent jamais complètement.

### b) Les sels

Les sels contenus dans l'eau de gâchage et l'eau de conservation, en réagissant avec les différents constituants du ciment peuvent améliorer ou altérer ses qualités.

### c) La température

Dans l'hydratation du ciment portland, la température joue un rôle à la fois thermodynamique et cinétique.

✓ Thermodynamique par ce qu'elle change la nature et la stabilité des hydrates.

Cinétique par ce qu'elle accélère ou retarde les réactions chimiques entre l'eau et les constituants anhydres.

L'abaissement de la température diminue le taux d'hydratation des ciments en allongeant la période dormante aux très basses températures ( $T^{\circ} < -10^{\circ}\text{C}$ ) les réactions chimiques ne se produisent plus, il est alors nécessaire d'utiliser des adjuvants accélérateurs ou de chauffer le ciment et l'eau de gâchage, le gel entraîne la destruction de la pâte du ciment durcie ou en cours de durcissement [27].

### c) Les adjuvants accélérateurs :

La plus part des accélérateurs de C3S interviennent au cours de la période précoce de l'hydratation, ils affectent essentiellement les hydrates C-S-H et  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Le chlorure de calcium est l'accélérateur le plus connu du C3S, il transforme le C-S-H fibreux treillis à mailles serrées par introduction du  $\text{Cl}^-$  dans son réseau cristallin [27].

### d) Le malaxage

Yang et Jennings ont étudié les effets de certains paramètres de malaxage sur le développement de la microstructure de pâtes de ciment quelques heures après la fin du malaxage (YANG 95). Ils observent, qu'au sein des amas de particules non désagglomérés par l'action du malaxage, l'hydratation des grains de ciment se trouve retardée de plusieurs heures. Outre un ralentissement de la cinétique d'hydratation, la persistance de ces amas

## Chapitre II : Etude Bibliographique

---

constitue probablement, à plus long terme, une source de désordres microstructuraux dans les pâtes de ciment insuffisamment malaxées (YANG 95).[29]

### II.17 Représentation du mécanisme de prise et du durcissement

#### a) La prise du ciment

C'est l'épaississement et la perte de mobilité de la pâte. Une des plus importantes propriétés techniques du ciment est sa rapidité de prise. La confection des éléments devient difficile (début de prise) ou impossible (fin de prise). Les délais de prise devront être correspondant au temps de confection des éléments. Généralement, le gypse est utilisé en quantité de 3 à 6 %, en qualité de régulateur de prise [27].

Le phénomène de prise du ciment s'accompagne d'une réaction exothermique dont l'importance dépend de différents paramètres, en particulier:

- la finesse de mouture: plus le ciment est broyé fin, plus la chaleur d'hydratation est élevée.
- la nature des constituants: les ciments CPA comportant presque exclusivement du clinker dégagent plus de chaleur que des ciments avec constituants secondaires.
- la nature minéralogique du clinker: plus les teneurs en aluminat tricalcique ( $C_3A$ ) et silicate tricalcique ( $C_3A$  et  $C_3S$ ) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte .
- la température extérieure.[30]

Le ciment durci est une véritable "roche artificielle" qui évolue dans le temps passant par trois phases :

#### ➤ *Phase dormante*

Où la pâte pure (ciment et eau) reste en apparence inchangée pendant un certain temps (de quelques minutes à quelques heures suivant la nature du ciment). En fait, dès le malaxage, les premières réactions se produisent ; mais sont ralenties grâce aux ajouts de gypse.

#### ➤ *Début et fin de prise*

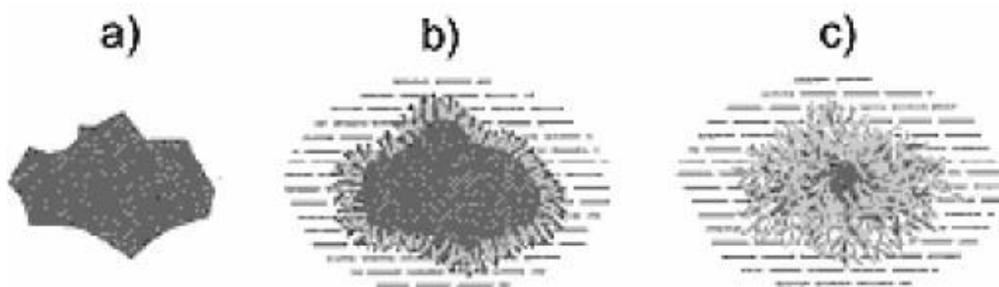
## Chapitre II : Etude Bibliographique

Après une ou deux heures pour la plupart des ciments, on observe une augmentation brusque de la viscosité. C'est le début de prise, qui est accompagné d'un dégagement de chaleur. La fin de prise correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide. Le temps de début de prise est déterminé à l'instant où l'aiguille de Vicat ( $S=1\text{ mm}^2$ , masse = 300 g) ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment.

Les ciments de classe 35 et 45 ont un temps de prise supérieur à 1h30 à  $T=20^\circ\text{C}$ . En revanche, les ciments de classe 55 et HP ont un temps de prise supérieur à 1h30 à la même température.

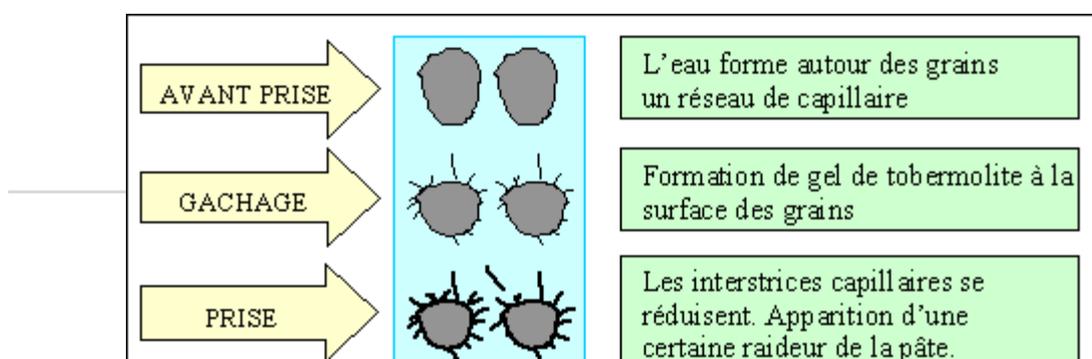
### ➤ Durcissement

On a l'habitude de considérer le durcissement comme la période qui suit la prise et pendant laquelle l'hydratation du ciment se poursuit. La résistance mécanique continue à croître très lentement; mais la résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle.[27]



**Figure. II.8.** Hydratation du grain de ciment [15].

- a) Grain de ciment avant l'adjonction d'eau
- b) Grain de ciment peu de temps après l'adjonction d'eau
- c) La plus grande partie du grain de ciment s'est transformé en gel de ciment



**Figure. II.19.** Les phases de l'hydratation. [30]

### b) Fausse prise

Les phénomènes de la fausse prise (raidissement très rapide de la pâte empêchant la mise en place) sont généralement expliqués par une rigidification de la pâte due à la formation de gros cristaux entre les grains de ciment, LOCHER 1977) présente 3 cas possibles de la fausse prise:

- ✓ Lorsque la réactivité de l'aluminate tricalcique et des sulfates est élevée, la quantité d'ettringite formée est telle qu'un raidissement prématuré intervient.
- ✓ Lorsque la réactivité des l'aluminate l'emporte sur celle de sulfates, c'est la formation de l'aluminate hydraté ou de mono-sulfo-aluminate de calcium hydraté qui provoque la fausse prise.
- ✓ Lorsque la solution interstitielle est sursaturée en sulfates (en raison par exemple de la présence accidentelle d'anhydrite dans le ciment), le raidissement est provoqué parla formation de cristaux de gypse [27].

## II.18 Propriétés techniques de ciment portland

### II.18.1 La résistance Mécanique

L'essai le plus important de la qualité du ciment consiste à déterminer la résistance à la compression qu'il produit dans un mortier selon la méthode d'essai au prisme au

## **Chapitre II : Etude Bibliographique**

---

mortier de la norme(EN196). La résistance à la compression développée dans un mortier (ou un béton) dépend des matériaux utilisés, des proportions du mélange, de la procédure de mélange et de l'efficacité avec laquelle le mélange est compacté dans un moule, ainsi que de la température, de l'humidité et du temps de durcissement.

L'aluminate tricalcique, en présence des autres minéraux du clinker, favorise la croissance rapide de la résistance pendant les premiers jours de durcissement. L'alumino-ferrite tétracalcique se comporte assez activement pendant le durcissement. On prend, la résistance à 28 jours pour unité, la croissance de la résistance d'un ciment Portland ordinaire serait de 0,36 à 3 jours, 0,67 à 7 jours, 1,5 à une année et 2,5 à deux ans. [31]

### **II.18.2 La consistance normale**

C'est l'épaississement et la perte de mobilité de la pâte. Une des plus importantes propriétés techniques du ciment est sa rapidité de prise. La confection des éléments devient difficile (début de prise) ou impossible (fin de prise).

Les délais de prise sont les moments après la fin du mélange où une pâte de ciment pure présente des résistances spécifiées à la pénétration d'une aiguille. Les principales variables qui influencent la pénétration sont la teneur en eau de la pâte, la température, la charge et la dimension de l'aiguille et, bien sûr, la réactivité du ciment. L'aiguille utilisée porte le nom de Vicat (1828). Les délais de prise initiale et finale, pour lesquels des valeurs minimales sont spécifiées dans les normes. Généralement, le gypse est utilisé en quantité de 3 à 6 %, en qualité de régulateur de prise. [31]

### **II.18.3 Le retrait de gonflement**

Si l'élément en ciment ou en béton se trouvait dans une atmosphère ayant une humidité relative inférieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier diminuent ; c'est le retrait. Si l'élément se trouvait dans une atmosphère à humidité relative supérieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier augmentent ; c'est le gonflement. Le gonflement entraîne aussi l'apparition des tensions internes, qui cependant, sont moins importantes que celles du retrait.

Le retrait peut-être dû au processus chimique, dans ce cas, il est appelé « contraction ». La valeur du retrait dépend d'un grand nombre de facteurs. Ainsi, les ciments alitiques et à grande finesse de mouture ont un faible retrait.

La diminution de E/C et l'utilisation d'agrégats fins donnent le même effet. La valeur du retrait varie de 3 à 5 mm/m et avec le temps s'annule. [31]

### **II.19 La fumée de silice (SF) dans CEM II**

## Chapitre II : Etude Bibliographique

---

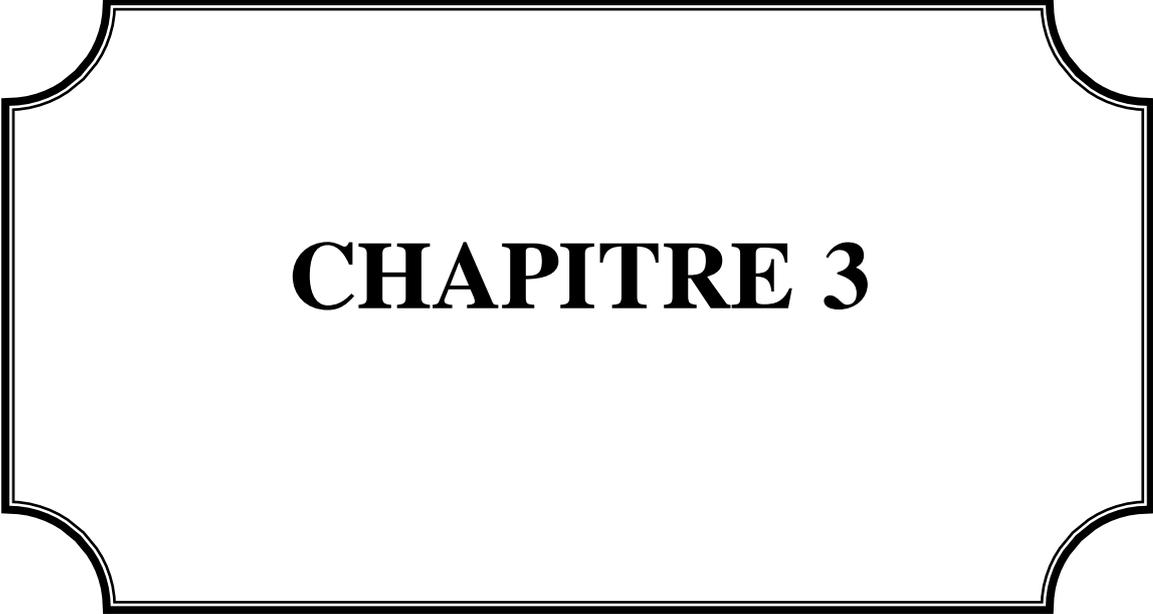
Notre étude s'intéresse par la production du ciment par l'ajout du fumée de silice SF que c'est des Composées de particules submicroniques de dioxyde de silicium est produite par un four à arc électrique en tant que sous-produit du processus de fusion dans la production de silicium métallique ou ferrosilicium dans l'industrie des alliages. La réduction du quartz de haute pureté en silicium à des températures allant jusqu'à 2 000 °C produit des vapeurs de SiO<sub>2</sub> qui s'oxydent et se condensent dans la zone à basse température en minuscules particules constituées de 85 à 99 % de silice amorphe [32]. Ensuite, le SF est composé de particules submicroniques de dioxyde de silicium qui se présentent sous la forme de sphères presque parfaites avec des diamètres allant de 20 à 500 nm [33]. On estime que la production mondiale actuelle de SF est, au plus, comprise entre 1 et 1,5 million de tonnes par an [34].

Le ciment Portland (PC) est incontestablement le principal matériau cimentaire actuellement utilisé dans la construction. Cependant, le SF a été utilisé comme matériau cimentaire à haute réactivité pouzzolanique pour fabriquer : béton à haute performance (BHP). De plus, on peut dire que le SF est l'ingrédient clé pour produire un tel béton à hautes performances. Il a été démontré que cet ajout dans les PC, tels que CEM II/A–D selon la norme européenne EN 197-1:2011 [35], entraînait des effets physiques et chimiques sur la microstructure des pâtes durcies, conduisant à une amélioration propriétés bien reconnues dans la technologie du béton, telles qu'une résistance plus élevée et une perméabilité plus faible [36]. Par conséquent, le HPC est de plus en plus utilisé dans les travaux de génie civil car il permet de réduire la taille des éléments structuraux, ce qui est essentiel dans les immeubles de grande hauteur. En plus de cela, une telle utilisation du HPC se développe maintenant dans des conditions de nature sévère.

### Conclusion

Ce chapitre nous a permis de collecter l'essentiel de connaissances concernant le ciment Portland. Partant de la matière première et ses constituants principaux entrant dans la fabrication du ciment ; leurs natures, leurs origines et leurs compositions chimiques favorables, et aussi de connaître les différentes ajouts au ciment et les différentes classes et types de ciment et selon notre étude qui s'intéresse par le ciment type II avec l'ajout du fumée de silice SF.





**CHAPITRE 3**

## Chapitre III

### Synthèse Expérimentale « Matérielles et Méthodes »

#### III.1 Matérielles et Méthodes

##### III.1 Introduction

Dans ce chapitre on a décrit les caractéristiques des matériaux utilisés lors de l'étude ainsi que le plan expérimental adopté pour la réalisation des différents essais expérimentaux.

Le broyage est utilisé pour produire la finesse désirée des ciments étudiés. Les différentes techniques de caractérisation des matériaux sont l'analyse physico-chimique.

##### III.2 Matériaux utilisés

Les différents matériaux de base utilisés sont le clinker, le gypse et la fumée de silice SF.

###### III.2.1 Concassage du clinker

Le clinker sortant du refroidisseur à 100°C est soumis un concassage afin de faciliter le processus de broyage.



**Figure III.1:** Un concasseur

## **Chapitre III : Etude Expérimentale (Matérielles & Méthodes)**

### **III.2.2 Broyage (broyeur à disque)**

Une fois le processus des échanges est terminé, les trois composants (clinker+gypse+SF) ; sont mélangés en semble dans la préparation du ciment. Dans le broyage chaque constituants, que ce soit le clinker, gypse, sable, SF ayant un temps de broyage spécifique.

### **III.2.3 Préparation des différents pourcentages à broyer**

On prépare nos différents mélanges de pourcentage 0%, 6%, 8% et 10% chaque un de ces derniers sont misent au disque de broyeur après l'installation du disque au centre fixé du broyeur on règle le temps spécifique de ces mélanges.



**Figure III.2:** Un broyeur

**Remarque :** chaque constituant à un temps et une vitesse de broyage spécifique.

## Chapitre III : Etude Expérimentale (Matérielles & Méthodes)

Tableau III.1 : Programmes broyage matières

Désignation	N°.Du programme	Temps de broyage (seconde)	Poids de l'échantillon	Remarques
Rinçage/Nettoyage	1	30	3 fois avec la même matière	Nettoyage avec sable
Clinker	2	110	100	Prés concassé
Calcaire	3	60	100	Prés concassé
Argile	3	60	100	Prés concassé
Gypse	2	30	100	Prés concassé
Sable	4	180	50	En l'état
Minerie de fer	4	180	100	Prés concassé

Toujours la vitesse de broyage à été constance égale 700 m/S.

### III.3 Analyse Chimique

#### III.3.1 Préparation des pastilles

- On sèche la matière à analyser à  $105^{\circ}\text{C}\pm 5$  (si la matière est humide).
- On pèse  $10 \pm 0.1$  g de la matière à analysée (broyer à une finesse  $< 50\mu\text{m}$ ), en ajoutant 0.6g de cellulose.
- Le programme choisi est 120s pour toutes les matières.
- On presse la matière avec la capsule à 20T (le temps : 1min).



Figure III.3: La pastilleuse.

## Chapitre III : Etude Expérimentale (Matérielles & Méthodes)

-Après avoir fini la préparation de la pastille nous mettons cette capsule dans la machine XRF (spectroscopie à fluorescence X) pour obtenir les pourcentages des différents constituants tel que :  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Lf}^*$ ,  $\text{C3}^*$ ,  $\text{C2}^*$ ,  $\text{To}$ .



**Figure III.4:** La Spectroscopie à fluorescence X 'XRF'.

## Chapitre III : Etude Expérimentale (Matérielles & Méthodes)

### III.3.2 Mesure des refus par tamisage ALPINE

Ce mode opératoire a pour but de décrire la démarche à suivre pour déterminer les refus par tamisage ALPINE.

#### Mode opératoire

- ✓ Une masse  $m_1=25\pm 0,5$  g du produit à tamiser aisée pendant 3min (2000Pa).
- ✓ La fin de d'opération, enlever 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 III.5 : L'appareil de refus par tamisage ALPINE

### III.3.3. Détermination de la chaux libre par acidimétrie

- Peser  $1\pm 0.1$  g de l'échantillon séché à  $105^\circ\text{C}$  et introduire la quantité pesée dans un Erlenmeyer de 250mL, mettre en place dans cet Erlen 50 ml d'éthylène glycol (99%, Sigma Aldrich) et agiter fortement puis le mettre dans un bain-marie à  $T=80^\circ\text{C}$ . On filtre le mélange et on étalonne le filtrat avec une solution de HCl 0. 1 N ((acide Chlorhydrique 36%, Biochem) en présence du bleu de Bromo-thymol (Biochem).

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

## Chapitre III : Etude Expérimentale (Matérielles & Méthodes)



**Figure III.6. :** La burette de filtre digital et la pompe de filtration

- D'après les résultats obtenus dans la burette de filtre numérique, nous pouvons conclure les pourcentages de % CAO résumé dans ce tableau :

**Tableau III.2 :** Résultats de % CaO des différents volumes  $V_{HCl}$

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

## Chapitre III : Etude Expérimentale (Matérielles & Méthodes)

### III.3.4 Détermination de la perte au feu

Ce mode opératoire a pour objet de déterminer la perte au feu dans les différentes matières.

#### Mode opératoire

- On pèse le creuset préalablement calciné P1 après taré on a ajouté 2 g de matière P2.
- Porter le creuset et le contenu dans un four à moufle à  $950^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$  pendant 30 minutes ensuite nous invit le couvercle et le laisser le creuset encore 10 min supplémentaires après on pèse P3, nous l'exprimons avec la relation suivante :

$$\% \text{ PAF} = [(P1+P2)-P3] \times 100 / (P2)$$

**P1 : masse Creuset**

**P2 : masse de produit**

**P3 : masse de creuset +Produit après calcination**



Figure III.7: Le four de calcination à  $950^{\circ}\text{C}$

## Chapitre III : Etude Expérimentale (Matérielles & Méthodes)

### III.4 Analyse Physique

#### III.4.1 Préparation des éprouvettes 4x4x16cm<sup>3</sup>

- Ce mode opératoire a pour but de décrire les étapes à suivre pour préparer les éprouvettes 4x4x16 cm<sup>3</sup>.

##### III.4.1.1 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 III.3** : Composition de mortier

Sable	Ciment	L'eau
450±2grammes	450±2grammes	225±1mL

##### III.4.1.2 Malaxage

- Le malaxeur étant en position de fonctionnement.
- Verser l'eau dans le récipient, mettre le malaxeur en marche à la vitesse lente pendant une minute (1min).
- Ajouter le sable dans les 30 dernières secondes.
- Malaxer le sable 2 minutes supplémentaires à la vitesse rapide, arrêter le mouvement pendant 90secondes avec le batteur démonté de son axe racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune partie du mortier n'échappe au malaxage.
- Reprendre le malaxage pendant 2min à vitesse rapide.



**Figure III.8:** Le Malaxeur.

### III.4.1.3 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.

- Mettre la machine en marche pour 60 chocs.
- 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 III.9: La table à chocs

### III.4.1.4 Conservation des éprouvettes dans l'eau

- Une fois démoulées et marquées et éventuellement pesées, les éprouvettes sont conservées entièrement immergées dans l'eau :
- La température de l'eau servant à la conservation des éprouvettes doit être  $20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}$ .

#### ❖ Détermination du temps de prise

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

#### ❖ Préparation de la pâte normale

- Remplir immédiatement le moule tronconique avec la pâte ainsi préparée et aplanir la surface au moyen d'une truelle prenant appui sur le bord du moule, perpendiculaire à la surface et déplacée d'un mouvement descendant à faible amplitude.
- Immerger dans l'eau le moule rempli de pâte normale ou le placer dans l'armoire humide.

#### ❖ Vérification de la consistance normale

- Pour faire la vérification de la consistance on utilise l'appareil de Vicat le moule rempli de la pâte immédiatement dans l'axe de la sonde, laisser descendre cette dernière perpendiculairement à la surface de la pâte et l'immobiliser à son contact, attendre un temps d'arrêt puis abandonner la sonde sans vitesse initiale.

## Chapitre III : Etude Expérimentale (Matérielles & Méthodes)

---

### ❖ Détermination du début de prise

- L'aiguille de Vicat, descendue perpendiculairement à la surface de la pâte et immobilisée pendant un court arrêt quand elle entre en contact avec cette surface est abandonnée à elle-même sans vitesse initiale.
- L'insertion de l'aiguille doit être surveillée les observations sont renouvelées jusqu'à constatation du début de prise.
- Les points de mesurer doivent être écartés d'au moins 2cm ou 3cm du début de prise.

### ❖ Détermination de fin de prise

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



Figure III.10: L'appareil de Vicat

### III.4.2 La résistance mécanique

-Après 2 jours 7 jours et 28 jours.

-nous apportons nos ciments que nous avons préparés dans le moulage.

-A la fin on le met dans la machine qui mesure la stabilité et va nous donner la résistance nos ciments.



Figure III.11: L'appareil de mesure la stabilité

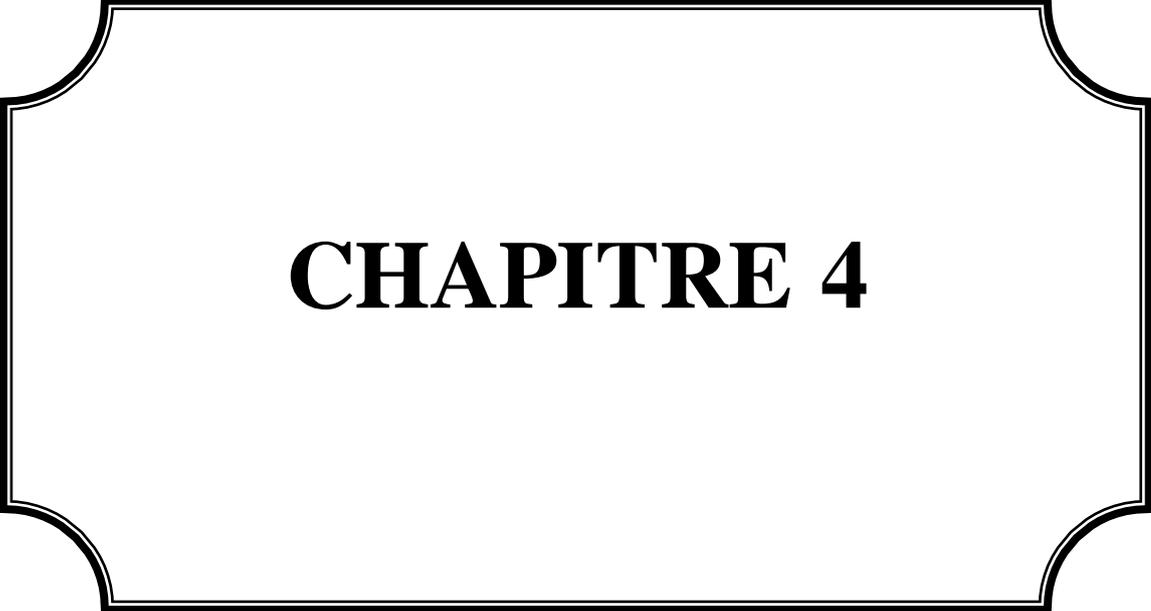
### III.4.3 Expansion

- Dans cet essai, l'hydratation du ciment est accélérée par un traitement thermique, ce qui permet de mesurer dans un délai très court, une éventuelle expansion.

La valeur de l'expansion est limitée à 10mm pour tous les types de ciments courants.



Figure III.12: L'appareil du Chatelier (aiguilles)



# **CHAPITRE 4**

### Chapitre 4

#### IV.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter les résultats des travaux expérimentaux qui ont été réalisés dans le cadre de notre projet de fin d'études et de donner des interprétations à ces résultats et les justifier. A la fin de ce chapitre nous tenterons de proposer une composition optimale du liant équivalent vis-à-vis de la résistance à la compression.

Cela nous a permis, grâce à des manipulations simples et rapides, d'identifier le meilleur pourcentage de l'ajout (SF) dans notre ciment le plus pratiquement résistant.

L'obtention de ces mélanges nous a permis d'étudier une série d'essais physiques et mécanique qui sont : la consistance normale, les temps de prise, ainsi les résistances mécaniques (compression et flexion).

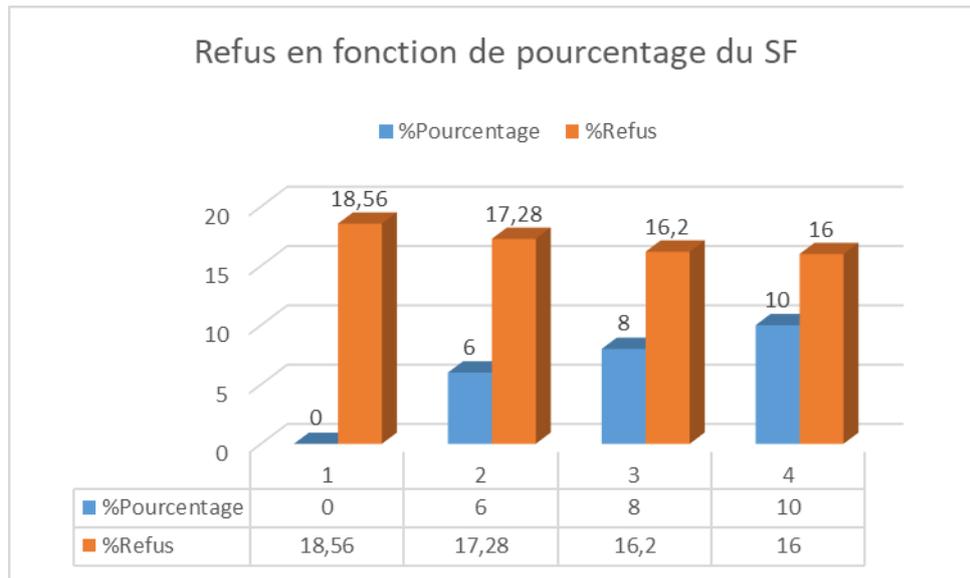
#### IV.2 Analyse chimique

##### IV.2.1 Effet du pourcentage d'ajout sur le pourcentage de refus

La figure ci-dessous de l'histogramme exprime le pourcentage d'ajout du SF sur le refus. Les pourcentages sont indiqués sur la figure suivante :

**Tableau IV.1** : temps du broyage utilisé pour le différent pourcentage

Pourcentage	0	6	8	10
Temps du broyage	3min	4min	4min30s	5min



**Figure IV.1:** Variation de pourcentage du refus en fonction pourcentage d'ajout.

### *Discussion*

A partir des résultats obtenus dans l'histogramme, on remarque une diminution du pourcentage de refus avec l'augmentation du pourcentage d'ajout de la fumée de silice SF dans le ciment.

Il existe une relation inverse, est due à l'augmentation du temps de broyage qui été évolué dans les différentes pourcentages du l'ajout SF.

Nous concluons plus que le temps de broyages est élevé, plus le pourcentage de refus dans le ciment n'est diminué.

L'augmentation de taux d'ajout de SF dans les ciments préparé diminue la granulométrie de ciment.

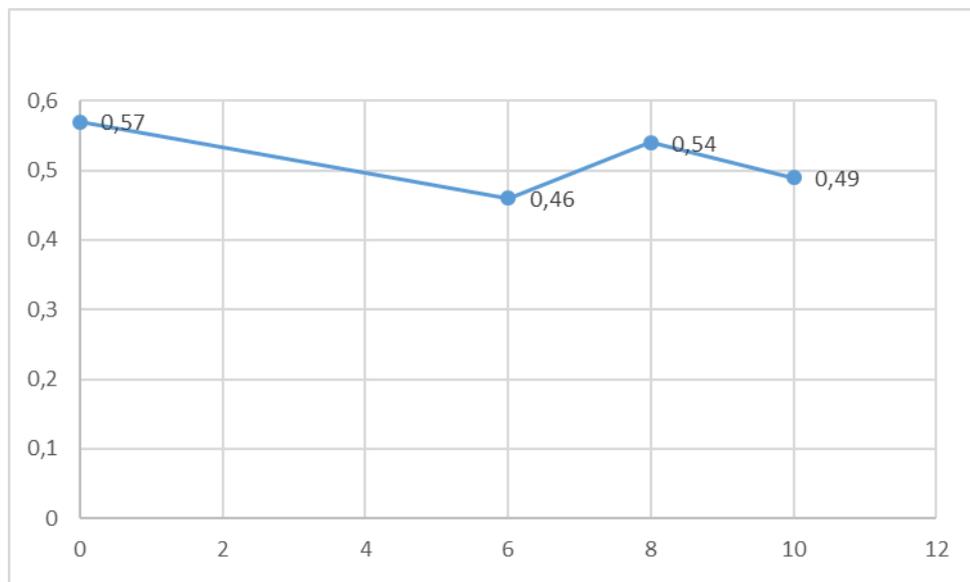
## Chapitre IV : Résultats & Discussion

### IV.2.2 Détermination de la chaux libre

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

**Tableau IV.2 :** Pourcentage d'ajout (SF) en fonction le volume d'acide HCL(ml)

<b>%Pourcentage du SF</b>	<b><math>V_{HCl}(ml)</math></b>	<b><math>CaO_L</math></b>
<b>0</b>	<b>2,07</b>	<b>0,57</b>
<b>6</b>	<b>1,68</b>	<b>0,46</b>
<b>8</b>	<b>1,99</b>	<b>0,54</b>
<b>10</b>	<b>1,79</b>	<b>0,49</b>



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

#### *Discussions*

On remarque dans l'évolution des pourcentages du l'ajout SF une diminution de la variation de la chaux libre marquant une détente de sa valeur dans le pourcentage 6% qui expriment une turbulence subite dans notre expérience.

Au principe la variation de la chaux libre diminue avec l'augmentation de l'ajout de telle façon stable ou instable.

Plus la fraction de la fumée de silice augmente plus la chaux libre diminue puisque le pourcentage de clinker diminue vu qu'il est responsable de la libération de la chaux.

## Chapitre IV : Résultats & Discussion

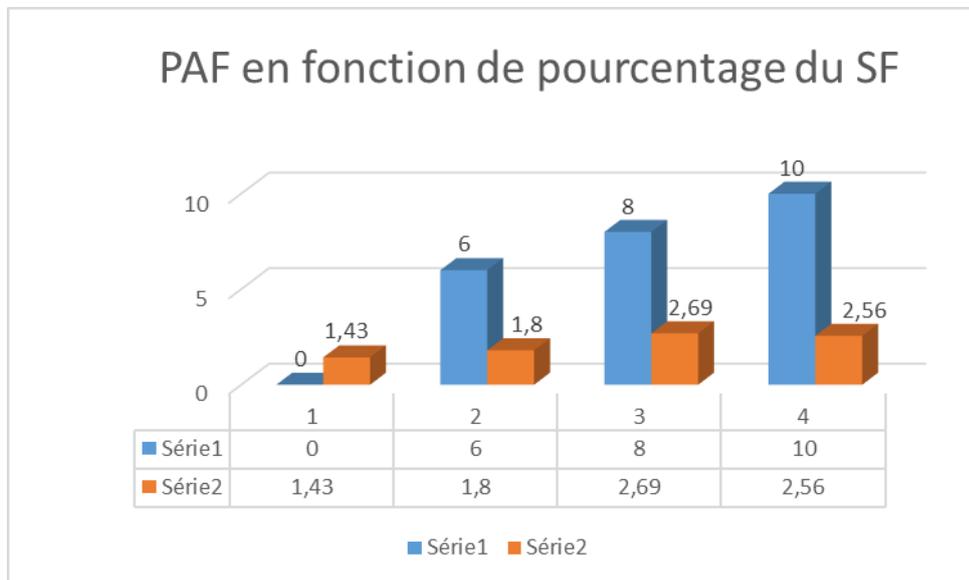
### IV.2.3 Pert eau feu

Les échantillons des ciments préparés sont introduits dans le four à 950°C. Les résultats calculés par la formule suivante sont présentés dans le tableau ci-dessous :

$$PAF = \frac{(P1+P2)-P3}{P2} \times 100$$

**Tableau IV.3 :** les Résultats obtenus Par calcul de la PAF des différentes pourcentages

Pourcentages % du SF	Résultats %
0	1,43
6	1,80
8	2,69
10	2,56



**Figure IV.3 :** Variation de la PAF en fonction du pourcentage du SF

#### *Discussions*

On Remarque que l'ajout de la fumée de silice influe sur la perte au feu de manière générale et sa présence joue un rôle sur l'augmentation de l'analyse de la PAF.

Sachant que la valeur caractéristique normale de la perte au feu PAF est prise entre 1% et 15%.

Ce qui montre que nos résultats des Pertes au feu sont conformes.

## Chapitre IV : Résultats & Discussion

---

### IV.3 Analyse physique

#### IV.3.1 Temps début et fin de prise

Tableau. IV.4: début et fin de prise du différent pourcentage

Pourcentage	Début de prise	Fin de prise
0	80min	128 min
6	166 min	200 min
8	220min	276 min
10	225 min	280 min

#### *Discussion*

D'après la lecture du tableau du début et fin de prise des différents pourcentages de l'ajout de la fumée de silice, on remarque une augmentation du début et fin de prise de ciment en parallèle de l'évolution du pourcentage de l'ajout SF (fumée de silice).

Ce qui montre qu'il existe une relation directe entre le début et fin de prise avec le pourcentage du l'ajout SF.

Cette augmentation du début et fin de prise est exprimé due à cause de l'augmentation de la variation de la viscosité.

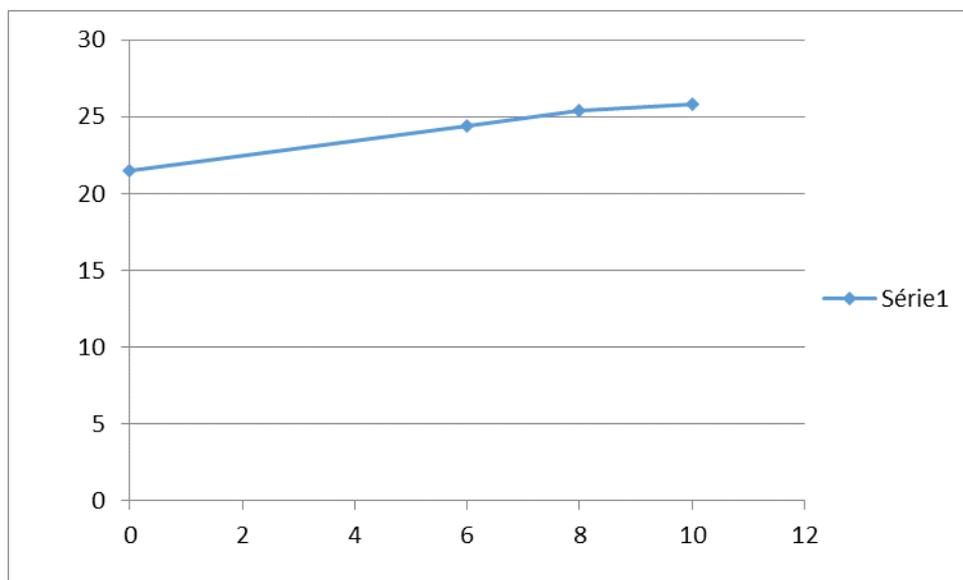
## Chapitre IV : Résultats & Discussion

### IV.3.2 Consistance

Ce tableau résume les résultats de consistance et de temps de prise de différent pourcentage :

**Tableau IV.5 :** Variation de début, fin de prise et la consistance normale.

Pourcentage	Consistance	Début prise	Fin Prise
0	21,5	80	128
6	24,4	166	150
8	25,4	220	276
10	25,8	225	280



**Figure IV.4 :** Evolution de la consistance en fonction du pourcentage SF

### *Discussion*

D'après la figure IV.5 et le tableau IV.6 qui présentent la variation de début-fin de prise et la consistance normale à différent pourcentages, on remarque une évolution de la consistance normale au fur et à mesure que le pourcentage de l'ajout de fumée de slice augmente c'est-à-dire la fumée de silice influe directement sur la consistance ainsi que cette dernière influe sur le début et la fin de prise.

Cette augmentation décrit la quantité d'eau de gâchage nécessaire pour la fabrication d'une pâte de ciment à consistance normale.

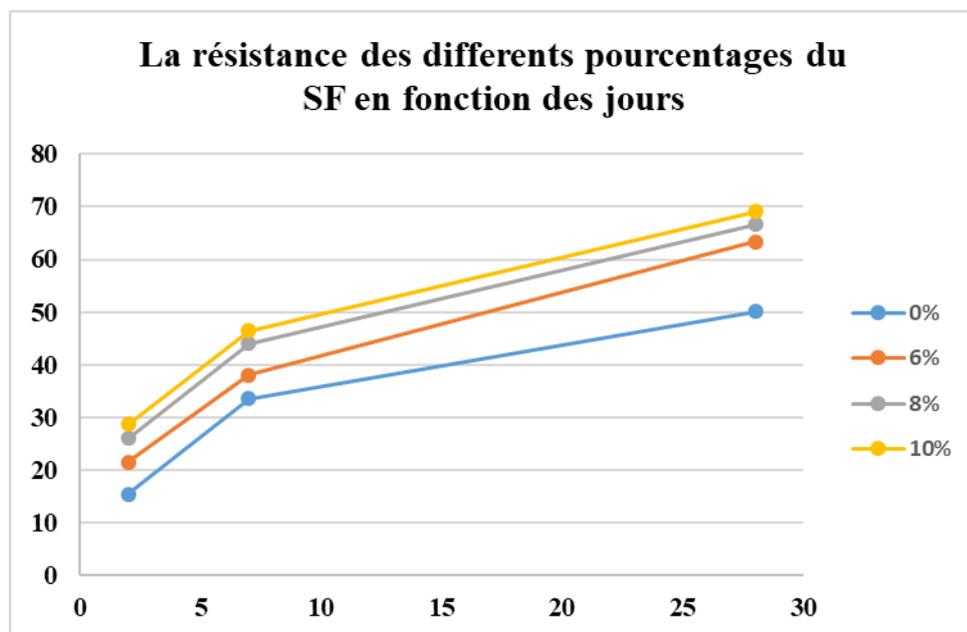
## Chapitre IV : Résultats & Discussion

### IV.3.3 La résistance mécanique

Ce tableau résume tous les résultats obtenus par mesure de stabilité :

**Tableau IV.6** : les Résultats obtenus Par mesuré la stabilité (résistance) du ciment

%Pourcentage	2 jours (MPa)	7 jours (MPa)	28 jours (MPa)
0	15,45	33,6	50,05
6	21,6	38,1	63,3
8	26	44	66,6
10	28,75	46,4	69,05



**Figure IV5** : Variation de résistance (2 jour ,7 jour et 28 jour) en fonction de pourcentage la fumée de silice.

#### *Discussions*

La figure présente l'effet de la fumée de silice sur la résistance mécanique à différents âges : 2, 7 et 28 jours. On observe des augmentations systématiques des résistances des mortiers aux âges 2 et 7 jours au fur et à mesure que le pourcentage de la FS augmente.

Le mortier sans ajout (0%) présente la valeur minimale de la résistance (50.05 MPa en 28 jour) ce mortier constitue notre repère.

## Chapitre IV : Résultats & Discussion

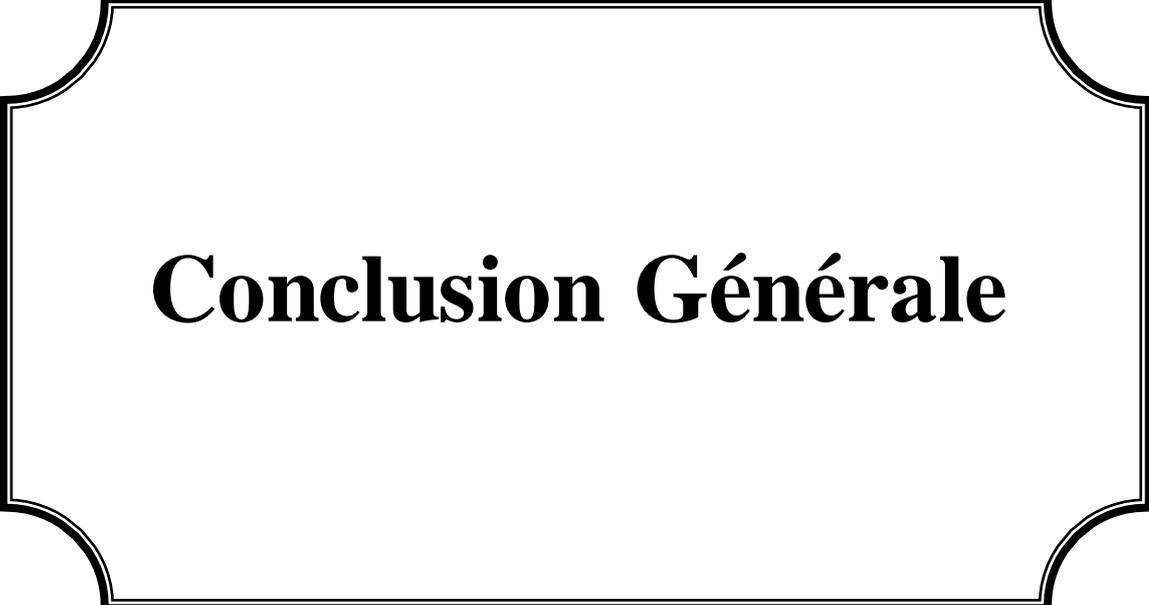
---

L'augmentation de la résistance du **béton** est donc progressive. La plus grande valeur de la résistance est obtenue à **28 jours**. C'est pour cela que le **béton** est classé conventionnellement selon sa résistance en compression mesurée à **28 jours**. On représente les résultats de la résistance en 28 jours ce qui suit :

- Dans le pourcentage 0% (Témoin) la résistance égale à 50.05 MPa
- Dans le pourcentage 6% la résistance égale à 63.3 MPa
- Dans le pourcentage 8% la résistance égale à 66.6 MPa
- Dans le pourcentage 10% la résistance égale à 69.05 MPa

On remarque que la valeur de la résistance augmente avec l'augmentation du pourcentage de la fumée de silice.

La résistance à la compression des bétons courants est comprise entre 20 et 50 MPa (au-delà de cette résistance on parle de BÉTONS à HAUTES PERFORMANCES) ce qui fallait indique que nos résultats de résistance sont très satisfaits et de très hautes performances.



# **Conclusion Générale**

## Conclusion

---

### Conclusion

Ce travail a porté essentiellement sur l'étude de l'influence du remplacement du ciment par la fumée de silice sur l'évolution des caractéristiques de ciment et les résistances mécaniques des mortiers.

La production de ciment (Portland CEM-II) avec l'ajout de fumée silice SF, à été mené par deux étapes principale tel que :

- La préparation du ciment avec différentes pourcentages de l'ajout de la fumée de silice SF (0% ,6%, 8%, 10%).
- L'analyse chimique et l'analyse physique.

C'est résultats nous a ont permis de connaître les avantages obtenus lors de l'utilisation du SF qui engendre comprennent des augmentations substantielles de la résistance à la compression et une durabilité accrue du béton durci lorsqu'il est ajouté en quantités optimales. En particulier, l'avantage de l'utilisation de SF est d'avoir une résistance mécanique plus élevée.

Selon notre étude on observe que le meilleur pourcentage obtenu d'après l'analyse physique et chimique—est le pourcentage 10% SF (ajout de fumée de silice) qui présente les résultats suivant :

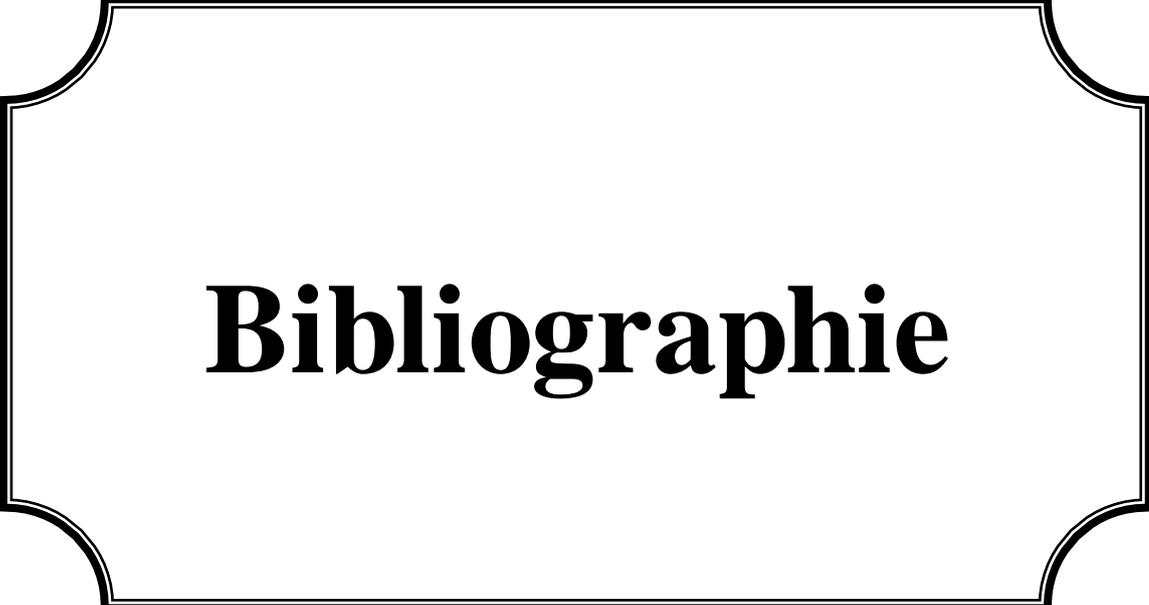
- La chaux libre égale 0.49 % qui se conforme aux normes établies par L'industriel GICA (chaux libre =0.5 %), sachant que plus que le pourcentage de chaux libre diminue plus que le résultat est bonne.
- Résultats de l'essai de l'expansion est presque stable au niveau des différentes pourcentages de l'ajout.
- La perte au feu est comprise entre 1 et 15% (PAF= 2.56%).
- Consistance normale 25.8%.
- Dans le pourcentage 10%SF la résistance égale à 69.05 MPa ce qui traduit une meilleure résistance enregistré parmi les différents pourcentages de l'ajout SF.

A la fin, de ce travail on peut dire que les résultats obtenus ont bien démontrés que la fumée de silice est un bon choix des ajouts qui sert au la production des ciments de haut performances est d'une classe de résistance plus élevée et plus fiable.

## **Conclusion**

---

Nous avons constaté que la substitution de cet ajout SF (fumée de silice) entraîne une conservation et un maintien des performances mécaniques. La substitution qui présente un intérêt environnementale, réduit la quantité de ciment et occasionne un gain de résistance.



# **Bibliographie**

### Bibliographie

- [1]. (le lien entre paramètre procès et qualité) MAJID SAMAR – CFIC - Septembre 2020 « groupe industriel des ciments d’Algérie-GICA »
- [2]. (fabrication du ciments) HAMID DERRADJI ,2018 « groupe industriel des ciments d’Algérie-GICA »
- [3]. (Présentation SCMI) FAYCEL ASRI 2017 « groupe industriel des ciments d’Algérie-GICA »
- [4]. (Optimisation des mélanges) FAYCEL ASRI 2018 « groupe industriel des ciments d’Algérie-GICA »
- [5]. Mémoire PFE (Diminution de la température d’air exhaure sorti du refroidisseur clinker),HASSNIA GHERNAJI 2015
- [6]. [http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/benabid-abderrahmane/files/chapitreiii\\_les\\_liants.pdf](http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/benabid-abderrahmane/files/chapitreiii_les_liants.pdf)
- [7]. <https://www.infociments.fr/ciments/fabrication-du-ciment-le-process>
- [8]. <http://doc.lerm.fr/la-fabrication-du-ciment-courant/#:~:text=Pr%C3%A9paration%20du%20cru,semi-humide%20>
- [9]. [www.febelcem.be/fr/ciment-applications/fabrication-du-ciment](http://www.febelcem.be/fr/ciment-applications/fabrication-du-ciment)
- [10]. Article ulmman 1986 site web <https://www.encyclopedia.com/education/news-wires-white-papers-and-books/ullman-ricky-1986>
- [11]. Rapport cambureau 1997 « THE AMERICAN CEMENT ASSOCIATION »
- [12]. [https://drive.google.com/file/d/1UCyg86mOM3oOYDoZhru7bpyzNTYxE-px/view?usp=drive\\_web](https://drive.google.com/file/d/1UCyg86mOM3oOYDoZhru7bpyzNTYxE-px/view?usp=drive_web)
- [13].[https://www.academia.edu/23941697/Chapitre\\_I\\_I\\_I\\_La\\_composition\\_chimique\\_des\\_clinkers](https://www.academia.edu/23941697/Chapitre_I_I_I_La_composition_chimique_des_clinkers)
- [14]. <https://www.infociments.fr/ciments/fabrication-du-ciment-le-process/le-contrôle-qualité>
- [15]. J. BROCARD, « Encyclopédie pratique de la construction et du bâtiment », Tome I, Librairie Aristide Quillet, 1972, P 813,815.
- [16]. J. BARON, J.P. OLLIVIER et J.C. WEISS, « Les bétons, bases et données pour leur Formulation », Edition Eyrolles,Troisième tirage, 1999, P 3-12.
- [17]. ITALCEMENTI GROUP, Ciments Calcia, disponible sur site web <<http://www.ciments-calcia.fr/pro/pdf/labelhrc.pdf>>.
- [18]. CHIKOUCHE MOHAMED AZIZ: « Effet des ajouts à base à base d’argile gréseuse et vaseuse sur les propriétés des matériaux cimentaire »
- [19]. M.MOULI, F.BENAICHE « Pouzzolane de Béni saf : Bilan de quelques études » colloques méditerranéen sur les matériaux, ENSET Oran.

## Bibliographie

---

- [20]. MEMOIRE BEN GHAZY ZIED : « Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique » ; thèse de magister ,université de Msila 2007/2008.
- [21]. « Dreux and Festa 2007 » thèse doctorat (nouveau guide du béton et de ses constituants)
- [22]. Article 11 (le procès et qualité du ciment) Majid samar 2019 groupe industriel des ciments d'Algérie–GICA
- [23]. GROUPE CEMENTS LUXEMBOURGEOIS, Séminaire – BETON 2001: Journée d'information technique 23 novembre 2001 Carlo KIRPACH.
- [24]. « Les composants de la matrice cimentaire » rappels et interaction ; société de l'industrie minéral ; 17 rue saint sevenir-75015-Paris.
- [25]. G. DREUX, « Nouveau guide du béton », Edition Eyrolles ,2ème édition, 1979.17.
- [26]. NORMAN F. MAC LEOD « 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 )Mars 2005 page 10-12
- [27]. 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.
- [28]. JEFFREY S. RUSSELL « Perspectives in civil engineering »
- [29]. PIERRE-CLAUDE AITCINE, Béton de haute performance, Edition Eyrolles.
- [30]. COURS EN LIGNE, Matériaux de construction, Les ciments, Chapitre 2, Disponible sur site web <<http://www.coursenligne.refer.org/>>
- [31]. Portland cement Third edition ,Gerry bye edited by Paul livesey technical editor lesliestruble
- [32]. [ACI \(American Concrete Institute\), ACI 363R-92: State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hill, MI,USA,2000](#)
- [33]. [ACI \(American Concrete Institute\), ACI 234R-96: Guide for the Use of Silica Fume in Concrete ,American Concrete Institute, Farmington Hill, MI,](#)





