

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

**Université Saad Dahleb BLIDA 1**  
**Faculté de Technologie**  
**Département de Génie des Procédés**



## **Mémoire**

En vue de l'obtention du diplôme de  
**MASTER EN GENIE DES PROCEDES**

**Spécialité : génie chimique**

Intitulé du mémoire

---

# **Impact de pouzzolane sur les propriétés physico-mécaniques du ciment**

---

**Présenté par**

**Amrouche fatma**

**Bouhemidi karima**

**Encadré par**

**Dr. BENOMAR Souhila**

**L'année universitaire 2023/2024**

# Remerciements

*Tout d'abord, nous remercions Dieu le tout puissant, de nous avoir ouvert les portes du savoir et nous avoir donnée, la volonté, la patience, la force ainsi que le courage afin de parvenir à la réalisation de ce travail.*

*Nous exprimons nos plus vifs et sincères remerciements à notre promotrice Madame **BENOMARS** d'avoir accepté de diriger ce travail durant lequel, elle a partagé avec nous ses connaissances et ses expériences. Nous lui remercions pour sa patience, sa disponibilité et le temps qu'elle nous a accordé afin que nous puissions finaliser ce travail.*

*Nous exprimons nos vifs remerciements à **Monsieur TOUMI.F**, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant d'examiner et d'évaluer ce travail.*

*Nous adressons nos sincères remerciements au centre d'étude et de services technologiques de l'industrie des matériaux de construction **CETIM** pour son aide et la fourniture des capacités et des moyens nécessaires au laboratoire pour mener à bien notre travail avec excellence.*

*Nos plus grandes salutations vont à l'ensemble du personnel du laboratoire physico-chimique de la cimenterie de **MEFTAH** pour leur esprit de collaboration, leur aide, leur gentillesse ainsi que leur patience.*

*En fin, nous remercions tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

**FATMA et KARIMA**

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à mes chers parents*

*La source de mes efforts, celle qui n'a cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, celle qui était présente à mes cotes pour me consoler quand il fallait, rien que pour Toi maman, tous les mots du monde ne suffiront pas pour te remercier.*

*Mon père l'homme de ma vie qui a fait beaucoup pour moi, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, rien que pour toi papa.*

*Mes meilleurs frères ANES et CHOUAIB et ABDELHADI*

*Sans oublier mes meilleurs amies KHADIDJA et MERIEM*

*A tous mes amis, ainsi que mes collègues de master 2*

*De promo2023-2024 Génie chimique.*

*Merci à tous d'être toujours là pour moi*

*FATMA et KARIMA*

### ملخص :

يعد الحفاظ على البيئة أولوية قصوى للعديد من الصناعات ، ولكنه أمر بالغ الأهمية بشكل خاص لصناعة الأسمنت ، التي تستهلك الكثير من الطاقة وتنتج كمية زائدة من غازات الدفيئة والغازات السامة الأخرى لكل طن من الأسمنت البورتلاندي ينتج حوالي 1 إلى 1.25 طن من ثاني أكسيد الكربون

بفضل الدراسات الحديثة في مجال تصنيع الأسمنت تعتبر المضاعفات المعدنية من أحدث التطورات في تركيب الأسمنت لأنها تساعد على تحسين الخواص الفيزيائية والميكانيكية وتقليل كمية الكلنكر المستخدمة وبالتالي انبعاث الغاز

في هذا العمل، ندرس إمكانية الاستبدال الجزئي للكلنكر بإضافة بوزولان إلى الأسمنت. تتمثل الدراسة في إعداد إسمنت مع بوزولان طبيعي عن طريق استبدال نسبة معينة من الكلنكر بنسب مختلفة من بوزولان. من أجل دراسة تأثير بوزولان على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للأسمنت مثل الدقة والانكماش ووقت التحديد والمتانة والقوة الميكانيكية.

تؤكد النتائج التي تم الحصول عليها في دراستنا أن استخدام البوزولان كمادة مضافة يساهم بشكل إيجابي في تحسين الخواص الفيزيائية والميكانيكية وتوفير الطاقة في إنتاج الأسمنت

**الكلمات الرئيسية:** بوزولان، كلنكر، فيزيائي ميكانيكي، متانة، تقلص، دقة، مقاومة ميكانيكية، ثاني أكسيد الكربون.

# Abstract

---

## **Abstract**

Preserving the environment is a major concern for any industry, particularly the cement industry which consumes a lot of energy and produces an excessive quantity of green house gas and other toxic gases. For each ton of portland cement, approximately 1 to 1.25 tons of carbon dioxide are produced. Thanks to recent studies in the field of cement manufacturing, mineral additives are considered one of the latest developments that have entered the composition of cement because they contribute to improving the physicomechanical properties and reducing the quantity of clinker used and therefore gas emissions.

In this work studies the possibility of partial substitution of clinker by the addition of pozzolan in cement. The study consists of preparing a cement with natural pozzolan by replacing a certain percentage of clinker with different percentages of pozzolan used.

To study the influence of pozzolan on the physicomechanical properties of cement such as fineness, shrinkage, setting time, durability and mechanical strength.

The results obtained in our study confirm that the use of pozzolan as an additive contributes in a positive way to the improvement of physico-mechanical properties and saving energy in the production of cement.

**Key words :** pozzolan, Clinker, physicomechanics, durability, shrinkage, fineness, mechanical resistance, carbon dioxide

## Résumé

---

### Résumé :

La préservation de l'environnement est une priorité absolue pour de nombreuses industries mais elle est particulièrement critique pour l'industrie cimentaire qui consomme beaucoup d'énergie et produit une quantité excessive de gaz carbonique à effet de serre et d'autres gaz toxique .Pour chaque tonne de ciment portland produit d'environ de 1 à 1,25 tonnes de gaz carbonique.

Grace à des études récentes dans le domaine de fabrication de ciment, les additifs minéraux sont considères comme l'un des derniers développements qui entrent dans la composition de ciment car ils contribuent à améliorer les propriétés physico-mécaniques et à réduire la quantité de clinker utilisé et donc les émissions de gaz.

Dans ce travail on étudie la possibilité de substitution partielle du clinker par l'ajout de pouzzolane dans le ciment. L'étude consiste à prépare un ciment avec la pouzzolane naturelle en remplant un certain pourcentage de clinker par des différents pourcentages de pouzzolane. Afin d'étudier l'influence de la pouzzolane sur les propriétés physico-mécaniques de ciment tels que la finesse, le retrait, le temps de prise, la durabilité et la résistance mécanique.

Les résultats obtenus dans notre étude confirment que l'utilisation de la pouzzolane comme ajout cimentaire contribue d'une façon positive à l'amélioration des propriétés physico-mécanique et économiser l'énergie dans la production du ciment.

**Mots clés** : pouzzolane, clinker, physico-mécaniques, durabilité, retrait, finesse, résistance mécanique, gaz carbonique.

# TABLE DES MATIERES

---

## TABLE DES MATIERES

- ✚ Remerciements
- ✚ Résumé
- ✚ Table des matières
- ✚ Liste des figures
- ✚ Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE .....	1/2
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE CIMENT	
INTRODUCTION.....	3
I.1-PRESENTATION DE CIMENTERIE.....	3
I.1.1-LOCALISATION.....	3
I.1.2- LES PRINCIPAUX CONSTRUCTEURS.....	3
I.1.3- LE SERVICE.....	4
I.2- DEFINITION DE CIMENT .....	4
I.3- LES CONSTITUANTS DE BASE DU CIMENT .....	4
I.3.1- MATIERES PREMIERES PRINCIPALE .....	4
I.3.1.1-CALCAIRE .....	4
I.3.1.2-L'ARGILE.....	5
I.3.2- MATIERES PREMIERES SECONDAIRE (DE CORRECTION).....	6
I.3.2.1-MINERAI DE FER ( $Fe_2O_3$ ) .....	6
I.3.2.2 LE SABLE ( $SiO_2$ ) .....	6
I.3.3-PRODUIT SEMI-FINI « CLINKER » .....	6
I.3.3.1-DEFINITION : .....	6
I.3.3.2-LA COMPOSITION CHIMIQUE : .....	7
I.3.3.3-LA COMPOSITION MINERALOGIQUE : .....	7
I.3.4-LE GYPSE .....	8
I.3.5- LES AJOUTES CIMENTERES .....	8
I.4- LES PROCESSUS DE FABRICATION DU CIMENT PORTLAND AU SCMI .....	8
I.4.1- LIGNE DE FABRICATION DE CRU .....	9
I.4.2- LIGNE DE CUISSON .....	10
I.4.3- LIGNE DE FABRICATION DU CIMENT .....	10
I.5- PROPRIETES PHYSICO-MECANQUES DU CIMENT.....	11
I.5.1-PROPRIETES PHYSIQUES .....	11
I.5.1.1- PRISE : .....	11
I.5.1.2-LA CHALEUR D'HYDRATATION : .....	11
I.5.1.3-FINESSE DE MOUTURE DU CIMENT .....	12
I.5.1.4-LE RETRAIT .....	12

## TABLE DES MATIERES

---

I.5.1.5- EXPANSION .....	12
I.5.2-PROPRIETES MECANIQUES : .....	12
I.5.2.1-RESISTANCE MECANIQUE.....	12
I.6- HYDRATATION DE CIMENT PORTLAND .....	14
I.6.1-HYDRATATION DES SILICATES .....	15
I.6.2-HYDRATATION DES ALUMINATES .....	17
I.6.3-HYDRATATION D'ALUMINATE FERRITE TRICALCIQUE .....	18
CONCLUSION .....	19
CHAPITRE II : L'AJOUT MINERAL ACTIF « LA POUZZOLANE »	
INTRODUCTION : .....	20
II.1-HISTORIQUE.....	21
II.2-UTILISATION DES AJOUTS EN ALGERIE.....	21
II.3-CIMENT POUZZOLANIQUE .....	22
II.4- LA POUZZOLANE .....	22
II.5-CARACTERISTIQUES DE LA POUZZOLANE.....	23
II.6-TYPES DE POUZZOLANE .....	23
II.6.1-LES POUZZOLANES NATURELLES : .....	23
II.6.1.1- VERRE VOLCANIQUE : .....	24
II.6.1.2-TUFS VOLCANIQUE COMPACTS.....	25
II.6.2-LA POUZZOLANE ARTIFICIELLE : .....	25
II.6.2.1-CENDRES VOLANTS : .....	25
II.6.2.2- L'ARGILE CALCINEE.....	26
II.6.2.3- FUMEE DE SILICE .....	26
II.7-CLASSIFICATION DE LA POUZZOLANE .....	27
II.8-ACTIVITE POUZZOLANIQUE.....	28
II.9-LES PROPRIETES DE LA POUZZOLANE .....	28
II.9.1-PROPRIETES CHIMIQUES .....	28
II.9.2-PROPRIETES PHYSIQUES DE REMPLISSAGE .....	28
II.10-L'EFFET DE LA POUZZOLANE .....	29
II.10.1- A L'ETAT FRAIS .....	29
II.10.2- A L'ETAT DURCI .....	29
II.11-L'INTERET D'UTILISATION DE LA POUZZOLANE.....	29
II.11.1- L'INTERET ECOLOGIQUE ET ENVIRONNEMENTAL.....	29
II.11.2-L'INTERET ECONOMIQUE .....	29
II.11.3-L'INTERET TECHNIQUE : .....	30
II.12- LES INCONVENIENTS DE L'UTILISATION DE LA POUZZOLANE .....	30

# TABLE DES MATIERES

---

CONCLUSION .....	30
------------------	----

## CHAPITRE III : PROCESSUS EXPERIMENTAL

INTRODUCTION : .....	31
----------------------	----

III 1.1- L'APPAREIL DE FLUORESCENCE X (OU SPECTROMETRE DE FLUORESCENCE X) : .....	31
---	----

III 1.2- LE CIMENT .....	31
--------------------------	----

III 1.3-LA POUZZOLANE NATURELLE .....	31
---------------------------------------	----

III 1.4-LE SABLE .....	32
------------------------	----

III 1.6- L'EAU DE GACHAGE .....	32
---------------------------------	----

III.2- PREPARATION DES ECHANTILLONS .....	32
---	----

III.3-METHODES PHYSIQUES .....	34
--------------------------------	----

III.3.1- MESURE DE LA SURFACE SPECIFIQUE PAR LA METHODE BLAINE : .....	34
--	----

III.3.1.1-DEFINITION .....	34
----------------------------	----

III.3.1.2-PRINCIPE.....	34
-------------------------	----

III.3.1.3 MODE OPERATOIRE .....	34
---------------------------------	----

III.3.2- MESURE DES REFUS PAR TAMISAGE ALPINE.....	35
--	----

III.3.2.1-DEFINITION .....	35
----------------------------	----

III.3.2.2-PRINCIPE.....	35
-------------------------	----

III.3.2.3-MODE OPERATOIRE.....	36
--------------------------------	----

III.3.3- PREPARATION DE LA PATE NORMALE.....	36
--	----

III.3.1-CONFECTION DE L'EPROUVETTE .....	37
--	----

III.3.2-VERIFICATION DE LA CONSISTANCE NORMALE : .....	37
--	----

III.3.4-ESSAI D'EXPANSION.....	37
--------------------------------	----

III.3.4.1- DEFINITION : .....	37
-------------------------------	----

III.3.4.2-TECHNIQUE DE L'ESSAI .....	37
--------------------------------------	----

III.3.5-DETERMINATION DU TEMPS DE PRISE .....	38
---	----

III.3.5.1-OBJECTIF : .....	38
----------------------------	----

III.3.5.LE PRINCIPE: .....	38
----------------------------	----

III.3.5.3- TECHNIQUE DES ESSAIS .....	39
---------------------------------------	----

III.3.5.3.1-DETERMINATION DE DEBUT DE PRISE : .....	39
---	----

III.3.5.3.2- DETERMINATION DE FIN DE PRISE : .....	39
--	----

III.4 .1- DETERMINATION DE LA RESISTANCE MECANIQUE PAR FLEXION ET PAR COMPRESSION : ..	39
--	----

III.4 .1.1- DEFINITION : .....	39
--------------------------------	----

III.4.1.2-PREPARATION DES EPROUVETTES .....	40
---	----

III.4.1.3-LE MOULAGE.....	40
---------------------------	----

III.4.1.4-DEMOULAGE DES EPROUVETTES PRISMATIQUES .....	41
--	----

III.4.1.5-CONSERVATION DES EPROUVETTES DANS L'EAU.....	41
--	----

III.4.1.6-ESSAI DE RUPTURE PAR FLEXION .....	41
--	----

III.4.1.7-ESSAIS DE RUPTURE PAR COMPRESSION : .....	42
---	----

## CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

INTRODUCTION : .....	42
----------------------	----

IV.1.1- DETERMINATION DE LA SURFACE SPECIFIQUE PAR LA METHODE BLAINE .....	42
--	----

## **TABLE DES MATIERES**

---

IV.1.2- REFUS .....	43
IV.1.3- INFLUENCE DE LA POUZZOLANE SUR LA CONSISTANCE NORMALE : .....	44
IV.1.4- EXPANSION (LA STABILITE) : .....	45
IV.1.5- TEMPS DE PRISE .....	46
IV.2-ANALYSES MECANIQUES .....	48
IV.2.1-INFLUENCE DE LA POUZZOLANE SUR LA RESISTANCE PAR FLEXION .....	48
IV.2.2-INFLUENCE DE LA POUZZOLANE SUR LA RESISTANCE PAR COMPRESSION .....	49
CONCLUSION .....	50
CONCLUSION GENERALE.....	51

BIBLIOGRAPHIE

# TABLE DES MATIERES

---

## LISTE DES FIGURES

Figure. I. 1 : Roche de clacaire.....	5
Figure. I. 2 : L'argile .....	5
Figure. I. 3 : L'oxyde de fer .....	6
Figure. I. 4 : Le clinker.....	7
Figure. I. 5 : Les lignes principales de la fabrication du ciment .....	9
Figure. I. 6: Evolution de chaleur de l'hydratation dégagé.....	15
Figure. I. 7 : Photo microscopique de CSH et CH .....	17
Figure. I. 8 : Photo microscopique d'Ettringite.....	18
Figure. II. 1 : La pouzzolane .....	23
Figure. II. 2 : Pouzzolane naturelle .....	24
Figure. II. 3 : Verre volcanique .....	24
Figure. II. 4 : Tuf volcanique .....	25
Figure. II. 5 : Les cendres volantes .....	26
Figure. II. 6 : Fumée de silice.....	27
Figure. III. 1: Appareil de SSB .....	35
Figure IV. 1: Variation de SSB en fonction du pourcentage de pouzzolane .....	42
Figure IV. 2 : Variation de refus en fonction du pourcentage de pouzzolane.....	43
Figure IV. 3 : Variation du rapport E/C en fonction du pourcentage de la pouzzolane.....	44
Figure IV. 4 : La variation de l'expansion en fonction du pourcentage de la pouzzolane.....	46
Figure IV. 5 : Variation de temps de prise en fonction du pourcentage de la pouzzolane.....	47
Figure IV. 6 : Evolution de la résistance à l'âge de 2,7 et 28 jours .....	48
Figure IV. 7 : Evolution de la résistance à la compression à l'âge de 2, 7 et 28 jours.....	50

# TABLE DES MATIERES

---

## LISTE DES TABLEAUX:

Tableau I. 1 : Différents minéraux du clinker.....	8
Tableau I. 2 : Exigences mécaniques et physiques définies en termes de valeurs caractéristiques .....	14
Tableau III. 1: Composition chimique du clinker .....	31
Tableau III. 2: Composition chimique de la pouzzolane .....	32
Tableau III. 3 : Composition chimique du sable.....	32
Tableau III. 4 : Composition chimique de l'eau de gâchage.....	32
Tableau III. 5 : Les combinaisons du ciment.....	33
Tableau III. 6 : Les analyses chimiques des cinq ciments préparés par fluorescences X.....	33
Tableau IV. 1 : Résultats de refus.....	42
<b>Tableau IV. 2</b> : Résultats de refus .....	43
Tableau IV. 3 : Résultats de consistance normale .....	44
Tableau IV. 4 : Résultats de l'expansion .....	45
Tableau IV. 5 : Le temps de prise.....	46
Tableau IV. 6 : La résistance à la flexion .....	48
Tableau IV. 7 : La résistance à la compression .....	49

## TABLEAU D'ABREVIATION

---

### TABLEAU D'ABREVIATION

Symboles	Signification
GICA	Le groupe industriel algérien du ciment
CEM	Ciment portland
SCMI	La société de ciment de la Mitidja
C <sub>2</sub> S	le silicate bicalcique
C <sub>3</sub> S	le silicate tricalcique
C <sub>3</sub> A	L'aluminate tricalcique
C <sub>4</sub> AF	L'alumino-ferrite tétracalcique
CSH	Silicate hydraté de calcium
CH	La portlandite (chaux libre hydraté)
AFm	monosulfate de calcium hydraté
NA	La norme algérienne
NF	La norme française
SSB	La surface spécifique
RF	Résistance à la flexion
RC	Résistance à la compression

# **INTRODUCTION GENERALE**

# INTRODUCTION GENERALE

---

## INTRODUCTION GENERALE

L'industrie du ciment est une industrie stratégique, cela est dû d'une part, au besoin urgent des pays, notamment industriels, d'établir des projets urbains tels que des logements, des usines et des entreprises, ainsi que des voies de transport et d'assurer la mise en place de bâtiments capables de faire face à diverses conditions naturelles. D'autre part, c'est une industrie simple par rapport aux grandes industries, et compte sur la disponibilité des matières premières pour cela.

L'Algérie est l'un des pays où l'industrie du ciment est un secteur dynamique et en croissance qui a connu des développements importants ces dernières années. Le groupe industriel algérien du ciment (GICA) a exporté 6 millions de tonnes de clinker en 2023, ce qui a entraîné des ventes estimées à 24 milliards de dinars.

Bien que le ciment soit considéré comme l'une des matières les plus importantes de la civilisation humaine, son processus de production émet de grandes quantités de gaz nocifs, notamment du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le principal contributeur au réchauffement climatique, la production d'une tonne de ciment émet environ une tonne de ce gaz, et le processus de fabrication contribue à environ 5% des émissions totales de CO<sub>2</sub>. Ceci est dû au fait que ce gaz provient de trois sources pour une cimenterie la combustion du carburant pour produire de l'énergie thermique qui constitue 54% des émissions, la production de l'énergie électrique qui constitue 12% et la décarbonatation du calcaire qui représente 34% [1].

Beaucoup de recherches ont été effectuées pour apporter des ajustements au processus de fabrication du ciment afin de réduire les émissions de gaz dans son industrie. L'attention des chercheurs a été dirigée vers l'utilisation d'additifs minéraux dans le ciment pour améliorer les mortiers tels que la maniabilité, la résistance mécanique et la durabilité. Ces additifs, notamment la pouzzolane, ont un impact significatif sur la rhéologie des substances toxiques, qui est directement liée à l'augmentation de la résistance et de la durabilité des solides.

L'utilisation de pouzzolane comme ajout dans le ciment non seulement réduire la consommation de clinker et en contribuant à résoudre les problèmes environnementaux liés à l'émission de CO<sub>2</sub> dans la production du ciment mais également améliore les propriétés physico-mécaniques des matériaux cimentaires, notamment la résistance aux attaques chimiques Cela est dû au fait qu'il contient une proportion élevée de silice, d'alumine et de fer, en alcalins, en magnésie et en chaux.

# INTRODUCTION GENERALE

---

En effet, notre travail s'inscrit dans le contexte d'étudier l'impact de la pouzzolane sur les propriétés physiques et mécaniques du ciment.

Pour atteindre les objectifs mentionnés, la mémoire est organisée de la manière suivante :

- **Dans le premier chapitre**, nous abordons une bibliographie générale sur le ciment et de son procédé de fabrication et leur hydratation.
- **Le deuxième chapitre**, nous avons abordé une étude générale sur la pouzzolane qui sera utilisée comme ajout au ciment, ses caractéristiques, ces types et son activité pouzzolonique avec l'eau.
- **Le troisième chapitre** traite des matériaux et des méthodes d'analyses physiques et mécaniques nécessaires pour atteindre le résultat de cette étude.
- Enfin, **le dernier chapitre** comprend les résultats des essais physiques et mécaniques sur cinq échantillons de ciment contenant différents pourcentages de la pouzzolane, à partir desquels nous pouvons déduire l'effet de l'ajout de la pouzzolane dans la composition de ciment.

Ce travail se termine par une conclusion générale qui rappelle les principaux résultats obtenus.

**CHAPITRE I**  
**GENERALITE SUR LE**  
**CIMENT**

# **CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE CIMENT**

## **Introduction :**

Le ciment est un matériau fondamental dans la construction, que l'on utilise pour fabriquer par combinaison avec le sable et le gravier et d'eau un mélange collant « béton ». Il est donc très important de connaître d'où vient cette poudre magique que nous appelons ciment et les processus de sa fabrication et ses propriétés mécaniques et physiques et c'est ce que nous aborderons dans ce chapitre.

## **I.1-Présentation de cimenterie**

### **I.1.1-Localisation**

La société de ciment de la Mitidja « SCMI » est l'une des 14 cimenteries affilié du groupe industrielle des ciments de l'Algérie « GICA » avec un capital social de 1.400.000.000 DA sa principale activité est la production et la commercialisation du ciment par an avec un effectif globale de 490 salariés.

La cimenterie est implantée dans la commune de Méftah wilaya de Blida près de la route nationale N° 29 qui relie Méftah à Khmis El -Khechna à l'Est et l'Arabaa à l'Ouest, il est également à environ 27 Km du port principal d'Alger, et à une quinzaine de kilomètres de l'aéroport international d'Alger. L'usine couvre une superficie de 429 601 m<sup>2</sup>, dont :

- Chaîne de fabrication : 40327 m<sup>2</sup>
- Les Bâtiments de l'administration : 620 m<sup>2</sup>
- Magasin : 1450 m<sup>2</sup>
- Bâtiments sociaux : 1400 m<sup>2</sup>

### **I.1.2- Les principaux constructeurs**

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

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

---

### **I.1.3- Le service**

L'unité cimenterie de Meftah a un caractère productif et commercial, la qualité de son produit ciment C.E.M II/A-L 42,5 N et son organisation lui permis de gagner la confiance de ces clients et réaliser des performances malgré une situation conjoncturelle néfaste. La capacité de production prévue est située à 01 million de tonnes /an

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

### **I.2- Définition de ciment**

Le ciment est défini essentiellement comme « un liant hydraulique », il a la propriété de durcir progressivement ou contact de l'eau (en terme plus précise gâcher avec l'eau).Après avoir durci, il peut maintenir sa résistance et sa stabilité même sous l'eau [2].

Le ciment présenté sous forme de poudre grise fine fabriquée à partir du clinker broyé, obtenu par la cuisson dans un four à haute température environ de 1450°C de 80% de calcaire et 20% d'argile. Ensuite des ajoutes sont mélanges au clinker généralement le gypse pour contrôlé le temps de prise du ciment et amélioré ses propriétés.

En termes de chimie, le ciment est un mélange constitué de sels minéraux anhydres instables (silicates et aluminates de calcium), qui produisent avec l'eau une pâte homogène qui a la capacité d'agglomérer des granulats (sable et gravier), et atteindre sa résistance maximale en un quelques jours [3].

### **I.3- les Constituants de base du ciment**

**I.3.1- Matières premières principale :** les matières premières utilisées pour la fabrication du ciment portland de l'usine de Méftah sont les suivantes :

**I.3.1.1-Calcaire :** le calcaire est un matériau couramment utilisé dans la fabrication du ciment, c'est une roche sédimentaire carbonatée caractérisée par une composition chimique dans laquelle prédomine le carbonate de calcium au moins de 50%.Pour que la réaction chimique de base de la fabrication du ciment commence avec la décomposition du carbonate de calcium

## Chapitre I : Généralités sur le ciment

---

( $\text{CaCO}_3$ ) en chaux (oxyde de calcium,  $\text{CaO}$ ) accompagnée d'un dégagement du gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) [4].



**Figure. I. 1 :** Roche de clacaire

**I.3.1.2-L'argile :** L'argile est une matière rocheuse composée principalement de la silice, de l'alumine et des oxydes de fer. Il recouvre toutes les petites particules formées par les processus d'érosion ou d'altération des roches, c'est-à-dire aussi bien du sable ( $\text{SiO}_2$ ), des oxydes (comme l'oxyde ferrique  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  qui donne la couleur rouge à certains sols), des carbonates comme la calcite, que tout autre minérale [5].



**Figure. I. 2 :** L'argile

## Chapitre I : Généralités sur le ciment

---

### I.3.2- Matières premières secondaire (de correction)

**I.3.2.1-Minerais de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) :** Le minerai de fer est une roche contenant du fer, souvent sous la forme d'oxydes, comme l'hématite. Les minerais de fer ont une teneur en fer variable selon le minéral ferrifère, sachant également que l'isomorphisme, presque toujours présent dans les minéraux naturels. Les principaux minerais de fer sont des sulfures, des carbonates et des oxydes [6].



**Figure. I. 3 :** L'oxyde de fer

Le minerai de fer joue un rôle important dans la fabrication du ciment. Par exemple, l'oxyde de fer peut influencer la couleur du ciment et certaines de ses propriétés physiques

**I.3.2.2 Le sable ( $\text{SiO}_2$ ) :** Le sable est un matériau naturel constitué de petites particules plus ou moins, dont la dimension varié de 0,15mm à 4,76mm. Il est contribue à améliorer les propriétés mécaniques du ciment et agit comme un activateur chimique, en fixant la chaux produite par le ciment pour former des composés hydratés [7].

### I.3.3-Produit semi-fini « Clinker »

#### I.3.3.1-Définition :

Le clinker est le principal intrant dans la fabrication du ciment Portland, ce dernier est un matériau nodulaire produit à l'étape de cuisson lors de production du ciment. Les nodules ou les particules de clinker ont un diamètre qui varie généralement de 3 à 25 mm et sont de couleur grise foncée.

Autrement dit, c'est un produit de la clinkérisation d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire (80 % environ) et d'argile (20 % environ) [8].



**Figure. I. 4 :** Le clinker

### **I.3.3.2-La composition chimique :**

Au point de vue chimique le clinker est essentiellement composé par les oxydes métalliques, les quatre principaux : l'oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ), de silicium ( $\text{SiO}_2$ ), d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), en plus des composants secondaires qui sont le plâtre ( $\text{SO}_3$ ), magnésie ( $\text{MgO}$ ), alcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) [9].

### **I.3.3.3-La composition minéralogique :**

La composition minéralogique du clinker Portland fait référence aux principaux minéraux qui la constituent. Le Clinker est principalement formé des quatre phases cristallines principales indiquées au tableau ci-dessous, et qui représentent environ 95% de sa masse [10].

## Chapitre I : Généralités sur le ciment

Tableau I. 1 : Différents minéraux du clinker

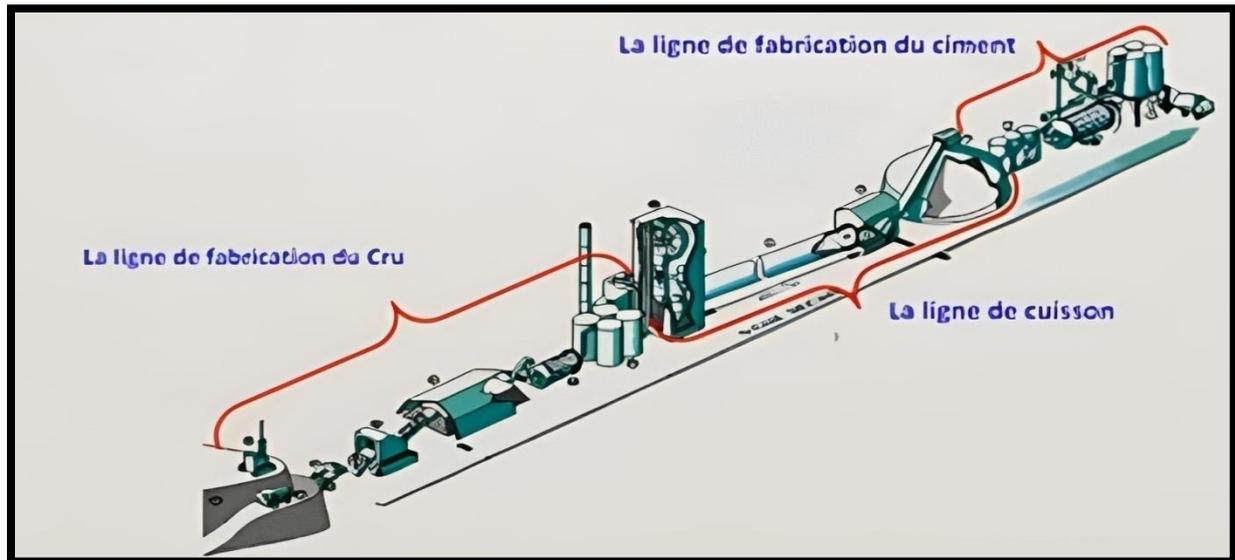
Minéraux purs	Minéral présent dans le clinker	Formules	Abréviation	Teneur dans le clinker %
le silicate bicalcique	Bélite	$2\text{CaO}, \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	45-65
le silicate tricalcique	Alite	$3\text{CaO}, \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	10-30
L'aluminate tricalcique	Célite	$3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	5-15
L'alumino-férrite tétracalcique	Célite	$4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_3\text{O}_4$	$\text{C}_4\text{AF}$	5-15

**I.3.4-Le gypse :** le gypse est une espèce minérale composée de sulfate di- hydraté de calcium de formule  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Utilisé comme régulateur de prise.

**I.3.5- Les ajoutes cimentières :** sont des minéraux qui sont combinés dans des proportions variables avec du clinker afin d'obtenir du ciment composite. Ils peuvent être d'origine naturelle comme le calcaire ou les roches volcaniques (pouzzolane), ou industriel comme les sous produits de l'industrie sidérurgie (laitier de haute fourneau), de l'industrie des microchips (fumée silice) et des centrales électriques au charbon (cendres volants). Ces ajouts rendent possible l'obtention de différentes catégories du ciment avec différentes propriétés [11].

### I.4- Les processus de fabrication du ciment portland au SCMI

La fabrication du ciment à l'unité de Méftah se fait par voie sèche et selon un procédé en continu, successivement. Peut regrouper les étapes de production en trois lignes principales (Ligne de fabrication de cru, ligne de cuisson et ligne de fabrication du ciment), (voir la figure ci-dessous).



**Figure. I. 5 :** Les lignes principales de la fabrication du ciment

### I.4.1- Ligne de fabrication de cru

C'est la première phase du processus de production du ciment, elle est depuis la carrière jusqu'au stockage de cru. Les matières premières principales (calcaire et l'argile) sont extraites par abbattage à l'explosif d'une carrière à ciel ouvert, et transportées à l'aide d'un dumper (camionne) vers les concasseurs, où le calcaire abattu passe par deux étapes de concassages la première réduit la taille de particules de 1000 mm à 100 mm, et la deuxième complète le concassage jusqu'à la taille de 30 mm. Alors que l'argile subit un seul concassage permet de réduire la taille des particules jusqu'à 30mm [12].

Les minéraux concassés sont échantillonnés en continu pour déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires pour faire la correction de la composition chimique et obtenir un mélange minéral un peu idéal. C'est l'étape de pré-homogénéisation des matières premières dans les halls de pré-homogénéisation [13].

A la sortie de l'opération de pré-homogénéisation, le mélange minérale préparé, séché est introduit dans un broyeur cylindrique remplie au tiers de son volume des boulets d'acier, afin d'obtenir une poudre fine appelée « farine cru », qui sera ensuite stockée dans des silos d'homogénéisation et qui sera soumise à un brassage intime par l'air, de manière à avoir une composition aussi homogène que possible [14].

## Chapitre I : Généralités sur le ciment

---

### I.4.2- Ligne de cuisson

La cuisson de farine cru se fait par deux parties : un préchauffage effectué dans un tour de quatre cyclones grâce à la réutilisation de la chaleur produite par le four qui permet une décarbonatation de 30% de la farine avant la pénétration du four à une température de 795°C au niveau de l'amont du four. La deuxième partie, dans un four cylindrique rotatif de 84 m de longueur et de 5,6 m de diamètre, avec un degré d'inclinaison de 3% par rapport à l'horizontale. Le cru s'achève la décarbonatation et progresse jusqu'au milieu du four à une température de 1450°C environ où les réactions de clinkérisation se produisent et donne les minéraux suivants :

- ❖ Bélite ( $C_3S : 3CaO \cdot SiO_2$  silicate tricalcique) : un composé actif permettant au ciment de développer une résistance très élevée.
- ❖ Allite ( $C_2S : 2CaO \cdot SiO_2$  silicate bicalcique) : 20% en moyenne, qui fournit au ciment sa résistance à long terme.
- ❖ Célite ( $C_3A : 3CaO \cdot Al_2O_3$  l'aluminate tricalcique) : le composé le plus réactif
- ❖ Célite ( $C_4AF : 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_3O_4$  Aluminate ferrite tétra calcique) : 12% en moyenne.

A la fin de cuisson et en quelques minutes le clinker est refroidi de 1450 °C à 100 °C dans un refroidisseur par soufflage d'air frais , afin de garder sa composition chimique et ensuite stocké dans des silos pour assurer une continuité de la production de ce ciment [15].

### I.4.3- Ligne de fabrication du ciment

Cette ligne concerne la transformation de clinker en ciment. Les granulés de clinker sont broyés finement avec 5% de gypse et éventuellement 15% à 20% d'un ou plusieurs constituants secondaires. Les opérations dites de broyage du ciment ont pour but d'accroître la réactivité du clinker, par augmentation de sa surface spécifique et par création de défauts de cristaux en surface de grains

Le produit fini (ciment) est transféré dans des silos de stockage, qui alimente par la suite les ateliers d'ensachage pour l'expédition en sacs, ou les dispositifs de chargement et livraisons en vrac . Lors de son stockage, le ciment est prélevé, analysé chimiquement et physiquement et des essais de résistance sur mortiers normalisés sont réalisés, afin de garantir son niveau de qualité [16].

### I.5- Propriétés physico-mécaniques du ciment

#### I.5.1-Propriétés physiques

##### I.5.1.1- Prise :

Le phénomène de conversion de ciment mélangé d'un état fluide à un état solide est appelé prise elle se déroule en trois étapes suivantes :

##### ❖ **Étape d'hydrolyse et d'hydratation:**

Cette étape est commencée après l'ajout de l'eau, les principaux composés du ciment ( C3S, C2S, C3A, et C4AF ) réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent la prise. Le composé C3S du ciment s'hydrate et forme un complexe d'hydrosilicates qui a une caractéristique de gel et une composition variée [17].

##### ❖ **Étape de colloïdisation :**

Au cours de cette étape , les mortiers (pâte de ciment, eau et sable ) deviennent saturés et ne peuvent plus absorber ,Cela est dû à la rupture des produits formés à l'étape précédente sous forme d'un gel qui s'épaissit progressivement et agit comme colle autour des granulats. Amorçant ainsi la prise du ciment.

##### ❖ **Phase de cristallisation**

À ce stade, la plupart des composants passent d'un état gelique ou colloïdal à un état cristallin. Les composés les moins stables, tels que l'hydro-aluminate tricalcique et l'hydroxyde de calcium, sont ceux qui doivent passer en phase cristalline stable. Le gel d'hydrosilicate de calcium durcit également presque simultanément. Cela conduit à la formation d'une masse solide et croisée de cristaux et de gels [18].

Pour la plupart des ciments courants, le début de prise à 20°C se situe entre 2 et 5 heures

##### I.5.1.2-La chaleur d'hydratation :

La chaleur d'hydratation est la chaleur générée lorsque l'eau et le ciment Portland réagissent. Elle est principalement affectée par les facteurs suivants:

- La proportion de C3S et de C3A dans le ciment
- La finesse de moulin
- La température extérieure

À mesure que chacun de ces facteurs augmente, la chaleur d'hydratation augmente [19].

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

---

### **I.5.1.3-Finesse de mouture du ciment :**

La finesse est une propriété qui se réfère à la taille des particules et à la surface spécifique, qui exerce un effet indirect sur la chaleur d'hydratation. Pour que, plus les particules sont plus fines, plus l'hydratation n'est accélérée.

La surface spécifique mesurée par des méthodes telles que le test de perméabilité à l'air (Blaine) ou la méthode de tamisage [20].

### **I.5.1.4-Le retrait :**

Le retrait est la réduction de volume de la matière dans le temps sans aucun changement extérieur mettant en jeu les phénomènes physico chimiques lors de l'hydratation de ciment avant, pendant ou après la prise. Il est mesuré dans le laboratoire de cimenterie sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de 4x4 cm<sup>2</sup>, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50% [21].

### **I.5.1.5- Expansion :**

L'expansion du ciment est un phénomène liée à la réaction chimique qui se produit pendant l'hydratation du ciment. Lorsque les oxydes de calcium ou de magnésium que peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux ou de magnésium sont hydratés

L'expansion se mesure sur pâte pure suivant un essai normalisé (norme NF EN 196-3) et grâce aux aiguilles de Le Chatelier. Il permet de s'assurer de la stabilité du ciment. L'expansion ne doit pas être supérieure à 10 mm sur pâte pure pour tous les ciments (conformément à la norme NF EN 197-1) [22].

## **I.5.2-Propriétés mécaniques :**

### **I.5.2.1-Résistance mécanique**

#### **Résistance courante**

La résistance courante d'un ciment est la résistance à la compression déterminée selon l'EN 196-1, mesurée à 28 jours. Elle doit être conforme aux exigences du Tableau 2.

Trois classes de résistance courante sont couvertes : classe 32,5 ; classe 42,5 ; classe 52,5 (voir Tableau 2).

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

---

### **Résistance à court terme**

La résistance à court terme d'un ciment est la résistance à la compression, déterminée selon l'EN 196-1, à 2 ou 7 jours. Elle doit être conforme aux exigences du Tableau 2.

À chaque classe de résistance courante, correspondent trois classes de résistance à court terme:

- Une classe de résistance à court terme ordinaire, notée N
- Une classe de résistance à court terme élevée, notée R
- Une classe de faible résistance à court terme, notée L

La classe L est uniquement applicable aux ciments CEM III qui sont alors des ciments de haut fourneau à faible résistance à court terme.

## Chapitre I : Généralités sur le ciment

**Tableau I. 2** : Exigences mécaniques et physiques définies en termes de valeurs caractéristiques

Classe de résistance	Résistance à la compression				Temps de début de prise	Stabilité (expansion)
	MPa					
	Résistance à court terme		Résistance courante		Min	Mm
	2 jours	7 jours	28 jours			
32,5 L a)	—	$\geq 12,0$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$	$\geq 75$	$\leq 10$
32,5 N	—	$\geq 16,0$				
32,5 R	$\geq 10,0$	—				
42,5 L a)	—	$\geq 16,0$	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$	$\geq 60$	
42,5 N	$\geq 10,0$	—				
42,5 R	$\geq 20,0$	—				
52,5 L a)	$\geq 10,0$	—	$\geq 52,5$	—	$\geq 45$	
52,5 N	$\geq 20,0$	—				
52,5 R	$\geq 30,0$	—				

a) Classe de résistance uniquement définie pour les ciments CEM III.

### I.6- Hydratation de ciment Portland

Contrairement à ce que l'on pense généralement. Le ciment n'a pas besoin de sécher pour durcir mais le durcissement est provoqué par un processus appelé « Hydratation ». Dans la chimie du ciment, le terme hydratation regroupe la totalité des changements qui se produisent dès qu'un ciment anhydre ou un de ses différents phase se trouve en contact avec l'eau.

Les réactions chimiques d'hydratation qui permettant le passage de la pâte de ciment (ciment + l'eau) de l'état liquide à l'état solide sont généralement plus complexes qu'une simple

## Chapitre I : Généralités sur le ciment

transformation en hydrates et s'accompagne d'un dégagement de chaleur dû à la rupture et à la création de liaisons chimiques pendant l'hydratation ce qui la rend exothermique.

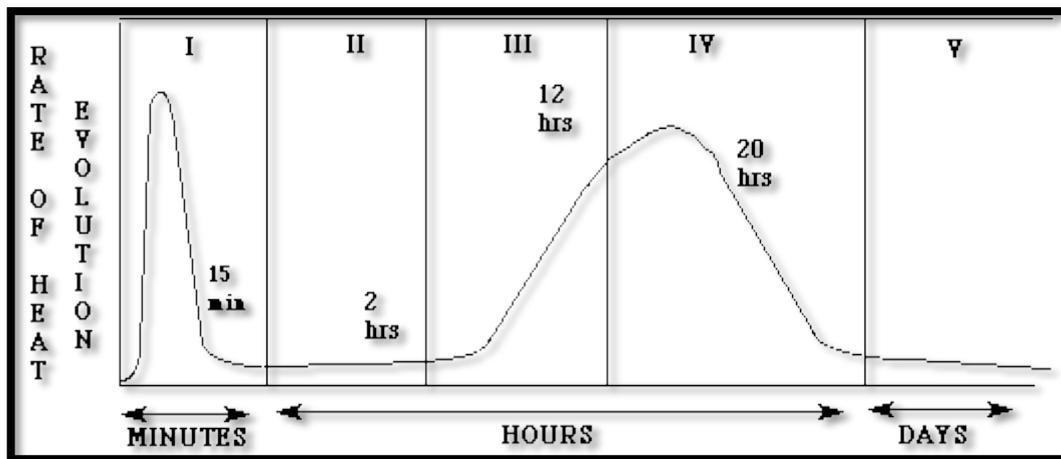


Figure. I. 6: Evolution de chaleur de l'hydratation dégagé

### I.6.1-Hydratation des silicates

L'hydratation des silicates notamment la phase la plus dominante dans le ciment portland « alite » est un processus crucial aboutissant à la formation de silicates hydratés de calcium (CSH) et de chaux libres hydratées connu sous le nom de portlandite (CH) sont à l'origine de la prise et le durcissement progressif du ciment, conférant à celui-ci ses propriétés mécaniques et résistances. Le silicate s'hydrate selon trois réactions successives qui se produisent simultanément.

- **Dissolution des C3S et C2S :**

Lors de contact intime (l'eau et ciment). L'eau est attirée par les particules de ciment et s'y fixe où les ions calcium et silicium présents dans le ciment se dissolvent selon les réactions suivantes:



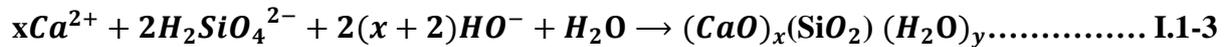
Cette hydrolyse initiale libère des ions calcium, des ions hydroxyde et une grande quantité de chaleur. Accompagné d'une augmentation rapide du pH plus de 12 en raison de la libération d'ions hydroxyde alcalin (OH<sup>-</sup>).

## Chapitre I : Généralités sur le ciment

---

- **Formation de gel C-S-H :**

Une fois notre système est saturé. L'hydroxyde de calcium commence à cristalliser. Simultanément, l'hydrate de silicate de calcium commence à se former. Cette précipitation complexe peut s'écrire sous la forme suivante :



Avec :

X : Le rapport molaire de SiO<sub>2</sub> (dioxyde de silicium) par rapport à CaO (oxyde de calcium).

Y: Le nombre de moles d'eau par mole de CSH.

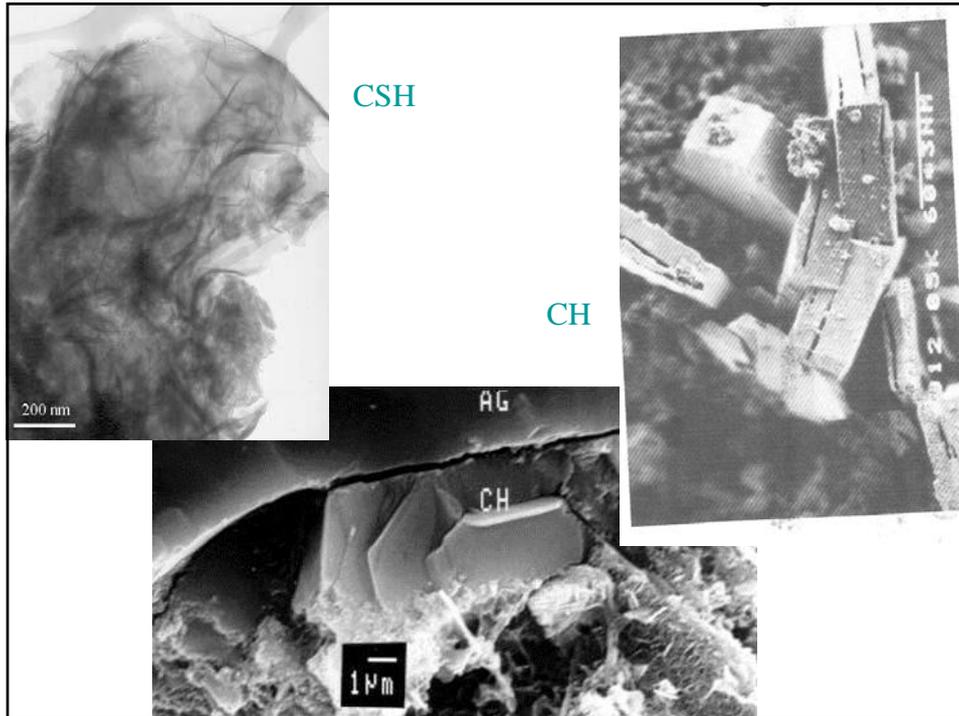
Le CSH est généralement composé de calcium, de silicium, d'oxygène et d'hydrogène mais peut également contenir d'autres éléments tels que l'aluminium, le fer et le magnésium. IL est souvent non-stœchiométrique, ce qui signifie que le rapport Ca/Si et la quantité d'eau ne correspondent pas à des nombres entiers. Cela est dû à la nature complexe de la structure du CSH et à la présence de défauts et d'impuretés.

- **Précipitation de la portlandite Ca(OH)<sub>2</sub> :**

Au fur et à mesure que l'hydratation progresse, le gel C-S-H se cristallise et forme des phases minérales plus stables, telles que la portlandite (CH) selon la réaction suivante :



Le CH ou portlandite est un composé chimique de formule Ca(OH)<sub>2</sub>. Son rôle principal réside dans l'amélioration de la maniabilité du ciment frais et le développement de la résistance à court terme.



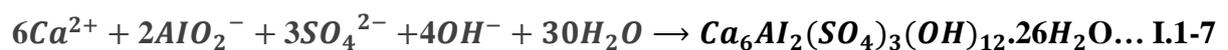
**Figure. I. 7 :** Photo microscopique de CSH et CH

**I.6.2-Hydratation des aluminates**

L'aluminate tricalcique est le composant le plus réactif du ciment Portland il réagit rapidement avec l'eau lors de l'hydratation. En absence de sulfate conduit à la formation d'hydrates d'aluminate de calcium (C-A-H) qui vont ensuite former des cristaux cubiques selon les réactions suivantes [23] :



Ces hydrates sont responsables de la prise immédiate et du durcissement du béton. C'est pour quoi les cimentiers ajoutent du gypse au clinker qui joue le rôle d'un régulateur de prise et qui retarde la précipitation des aluminates de calcium hydratés en donnant d'abord du trisulfoaluminate de calcium hydraté (Ettringite) [23].





**Figure. I. 8 :** Photo microscopique d'Ettringite

L'ettringite continue à se former lentement à la surface de la phase aluminates, bien plus forte que la couche de C-A-H hexagonal et métastable qui se forme en absence de sulfates, une fois le gypse est épuisé, la concentration en sulfates de la solution diminue . L'ettringite devient alors instable et se dissout pour former du monosulfate de calcium hydraté (appelé AFm) :  $((\text{CaO})_3(\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{CaSO}_4), 12\text{H}_2\text{O})$  [23].

### I.6.3-Hydratation d'aluminates ferrite tricalcique

Le  $C_4AF$  (aluminates ferrite tricalcique) est un autre composé important présent dans le ciment Portland, aux côtés du  $C_3A$  que nous avons déjà étudié. L'hydratation du  $C_4AF$  présente des similitudes avec celle du  $C_3A$ , mais il est nettement plus lent à réagir et n'apparaît de manière significative qu'une fois que le gypse est totalement épuisé. Cette séquence d'hydratation est caractérisée par des réactions distinctes et des produits spécifiques tels que l'aluminoferrite de calcium hydraté.

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

---

### **Conclusion :**

Le ciment est une poudre magique résultant du refroidissement immédiat du clinker cuit à haute température.

Les multiples utilisations du ciment et son importance capitale ne peuvent pas couvrir les effets environnementaux qu'il cherche à réduire ou même à éliminer. À cet égard, des efforts ont été faits comme la substitution partielle du clinker par des matériaux alternatifs notamment la pouzzolane.

**CHAPITRE II**  
**L'AJOUT MINERALE ACTIF**  
**« LA POUZZOLANE »**

### CHAPITRE II : L'AJOUT MINERAL ACTIF « LA POUZZOLANE »

#### Introduction :

Les ajouts cimentaire font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment. L'objectif d'ajouts comme la pouzzolane est de réduire la quantité de clinker utilisé dans la fabrication de ciment et remplacer cette quantité par l'ajout utilisé et donc limité les émissions de CO<sub>2</sub> : les émissions énergétiques qui sont liées à la production de l'énergie thermique nécessaire a la fabrication de clinker et les émissions de procédés qui sont dues au fait que le CO<sub>2</sub> fait partie des produits de la réaction chimique qui transforme le carbonate de calcium en clinker, au plus les émissions qui sont dues au transport des matières premières et à la consommation d'électricité et éliminer de nombreux problèmes environnementaux et permet d'obtenir un béton de meilleure qualité avec des propriétés spécifiques[24].

Les ajouts sont divisées en deux types naturels et artificiels selon l'activité en actif ou inerte.

- Les ajouts inertes : sont des matériaux naturels ou artificiels ne jouent aucun rôle dans le processus de fabrication de ciment (ne sont pas actif). Elles sont ajoutés dans un but d'améliorer les propriétés physiques du ciment portland tels que : ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau, parmi ces ajouts on trouve les fillers calcaire et les schistes calcinés. les ajouts les plus utilise en Algérie sont : le calcaire, le sable et la craie [25].
  
- Les ajouts actifs : on a deux types
  - Les ajouts actifs naturels : elles sont d'origine sédimentaire comme les dolomites, les tripolis et la gaize, ou d'origines volcaniques comme les pouzzolanes, les cendres volantes, le tuf, et la prière ponce.
  - Les ajouts actifs artificiels : elles sont les déchets siliciques, les argiles, les cendres de combustible, les laitiers métallurgiques [26].

### **II.1-Historique**

La cote d'oranaise connaît une intense activité volcanique depuis la fin de l'époque tertiaire, ces volcans passent d'Est en Ouest, de volcans acides à des volcans basiques ou les formations basaltiques sont dominantes [27].

La partie côtière du tell oranaise a été principalement affectée par l'activité volcanique entre la fin de Miocène et le quaternaire, qui est liée à la deuxième étape de l'activité tectonique, appelé phase de la tectonique cassante [27].

Années 1990 : La recherche s'intensifie pour comprendre et améliorer les propriétés des bétons à base de pouzzolane. Les études montrent que la pouzzolane améliore la durabilité et la résistance aux agressions chimiques des bétons[27].

2000-2005 : Des innovations dans le traitement et l'optimisation de la pouzzolane sont développées. La pouzzolane commence à être mélangée avec d'autres matériaux pour créer des bétons aux propriétés spécifiques [27].

2010-2015 : La pouzzolane est largement adoptée dans les projets de construction durable. Elle est utilisée dans la construction de routes, de barrages, et de bâtiments, en particulier dans les régions volcaniques où elle est abondante [27].

2016-2019 : Les recherches se concentrent sur l'amélioration de la performance des bétons pouzzolanique dans diverses conditions climatiques. La pouzzolane est de plus en plus intégrée dans les normes de construction pour les infrastructures durables [27].

2020-2023: Avec la pandémie de COVID-19, l'industrie de la construction connaît des perturbations, mais l'intérêt pour les matériaux durables reste fort. La pouzzolane continue d'être valorisée pour ses avantages écologiques [27].

2021-2023 : La pouzzolane est utilisée dans des projets de construction verte et d'infrastructures résilientes face au changement climatique. Des innovations technologiques permettent de mieux incorporer la pouzzolane dans les bétons pour améliorer leur longévité et leur résistance [27].

## **Chapitre II : L'ajout minéral actif « la pouzzolane »**

---

### **II.2-Utilisation des ajouts en Algérie :**

L'industrie de ciment revêt une importance capitale pour l'Algérie, en raison de la disponibilité des ajouts qui sont très peu coûteux comme le laitier d'El-Hadjar et la pouzzolane naturelle ou le calcaire de Béni-Saf. Ce qui contribue à accroître la fabrication de ciment [28].

### **II.3-Ciment pouzzolanique :**

C'est un mélange entre le ciment portland et la pouzzolane, la disponibilité de pouzzolane en quantité considérable en Algérie c'est ce qui a fait dépendre l'Algérie dans la production de ciment pouzzolanique.

Les sociétés des ciments de ZAHANA et de Béni-Saf l'un des cimenteries qui utilise la pouzzolane comme ajout principal pour la production de ce type de ciment. La norme Algérienne NA 442 : 2000 stipule pour le ciment CEM II/A un pourcentage d'ajout variante de 6 à 20% et un pourcentage variant de 21 à 35 % pour le ciment CEM II/B [29].

Le ciment pouzzolanique est largement utilisé dans le domaine de la construction parce-que l'utilisation de pouzzolane comme ajout cimentaire est d'amélioré ses propriétés physiques et mécaniques et on obtient ainsi un matériau final de haute qualité.

### **II.4- La pouzzolane :**

La pouzzolane est le résultat d'une éruption volcanique est appelé « pyroclastites » ou de roche sédimentaires, on le trouve en Algérie en grande quantités dans différentes régions qui s'étendent le long de 160 km entre la frontière Algéro-Marocaine et le Sahel d'Oran [29].

Elle est riche en silice et en alumine et le reste est représenté par l'oxyde de fer et d'autres oxydes avec un petit pourcentage de chaux(CaO). Ce produit est commercialisé car il ne nécessite pas d'énergie coûteuse s'il ne s'agit pas de la moindre quantité de broyage, d'où une économie importante être effectuée principalement pour un pays qui importe comme l'Algérie [30].

Les pouzzolanes les plus acides ayant une proportion moindre de chaux et de silice, sont généralement plus vitreuses. Pour être perceptible, la différence  $\text{SiO}_2\text{-CaO}$  doit être supérieure à 34 %. Selon Meaf (1977), les pouzzolanes sont des matériaux qui n'ont pas de propriétés liantes entre elles, mais qui combinées à la chaux en présence d'eau et à température

## Chapitre II : L'ajout minéral actif « la pouzzolane »

---

ambiante, génèrent des composés insolubles stables aux propriétés liantes corrélés (chaux+ eau+ pouzzolane = silicate de calcium hydraté) [31].

Actuellement en Algérie, le gisement de Bouhamidi situé à 2,5 km de Béni-Saf demeure l'unique gisement exploité. Il produit de 1000 à 1400 tonnes/jour qui sont distribués à l'Est et l'Ouest de pays.



Figure. II. 1 : La pouzzolane

### II.5- Caractéristiques de la pouzzolane :

- La pouzzolane est principalement composée des éléments chimiques suivants :  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$  (ASTM C 618).
- La teneur en verre : on peut connaître la qualité de la pouzzolane par la valeur du verre qu'elle contient. C'est la différence entre les teneurs brutes en silice et en chaux.

Si cette différence (I) est inférieure à 34 %, les pouzzolanes ne comportent pas de phase vitreuse.

Si  $I > 34\%$ , les pouzzolanes sont acides et comportent une phase vitreuse donc il est possible de fixer la chaux libérée par le ciment.

- Indice d'activité I doit être :  $0.67 < I < 1$  [31].

### II.6- Types de pouzzolane

Il existe deux types de matériau pouzzolanique qui sont naturels et artificiels.

#### II.6.1- Les pouzzolanes naturelles :

Le mot pouzzolane vient du nom d'une ville italienne de la région de Naples appelée Pouzzoles. C'est une roche volcanique de composition trachytique, elle est utilisée pour la

## Chapitre II : L'ajout minéral actif « la pouzzolane »

fabrication du ciment et de mortier. Selon le degré d'oxydation de fer sa couleur peut varier du noir au rouge, apparaissant comme de la magnétite ou de magnétique. Principalement attribuée aux produits à base de silice, d'aluminium et d'oxyde de fer tels que : le verre volcanique et le tuf volcanique [32]. Certaines origines sédimentaires comprenant la diatomite et terre à diatomée, la gaize, les tripolis [33].



Figure. II. 2 : Pouzzolane naturelle

### II.6.1.1- Verre volcanique :

Elles sont les roches pyroclastiques à faible cohésion résultant d'éruption volcanique. Qui sont dans un état vitreux avec peu d'interaction avec le milieu actif qui les rend vulnérables à l'attaque de l'hydroxyde de calcium. Par exemple : pouzzolane de SANTORIN, de BALCOL en Italie et de SHIRASHU en Japon [34].



Figure. II. 3 : Verre volcanique

## Chapitre II : L'ajout minéral actif « la pouzzolane »

---

### II.6.1.2-Tufs volcanique compacts :

Ce sont les mêmes roches que les verres volcaniques, mais elles ont subi des modifications chimiques. La production de minéraux zéolitique résulte de l'altération du verre volcanique dans les circonstances hydrothermales. Ce type de pouzzolane se distingue par sa texture dense et compacte [34].



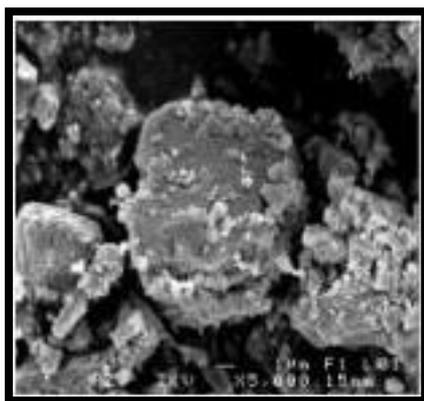
Figure. II. 4 : Tuf volcanique

### II.6.2-La pouzzolane artificielle :

Les matériaux qui composent les pouzzolanes artificielles sont essentiellement la silice, l'aluminium et l'oxyde de fer qui ont subi un traitement thermique pour garantir leurs propriétés pouzzolanique comme l'argile, le schiste, latérite et bauxite [35].

#### II.6.2.1-Cendres volants :

Les résidus de cendre issus de la combustion de la houille pulvérisée dans les centres thermiques sont appelés cendres volants. Ils sont divisés en trois différents types selon la teneur d'oxyde de calcium : les cendres volants qui contiennent de 8% de CaO et celles allant de 8 à 20% de CaO et le dernier type est composé plus de 20%. Le composant principal est une phase vitreuse composée de 50 à 90% d'aluminium et de silice. Leur forme peut être sphérique et leur répartition granulométrique peut ressembler à celle du ciment portland, ils peuvent contenir des cristaux cristallins ou dans d'autres cas, uniquement des particules angulaires [36].



**Figure. II. 5** : Les cendres volantes

### **II.6.2.2- L'argile calcinée :**

Elle est utilisée dans la construction du béton conventionnel. En partie, elle peut être utilisée à la place du ciment ou de clinker. Voici des exemples d'argiles utilisées pour obtenir des pouzzolanes artificiels : kaolinite, argiles, illite et schiste, muscovite. La poudre de métakaoline de grande surface spécifique est obtenue en broyant puis en calcinant de l'argile composée principalement de kaolinite. La majorité des particules qui composent le métakaoline sont des particules d'aluminosilicate réactives  $Al_2O_3$  et de silice  $SiO_2$  amorphes aux propriétés pouzzolanique. Les températures de calcination du métakaoline varient de  $600^{\circ}C$  à  $850^{\circ}C$  selon l'ordre de la kaolinite.

Le matériau subit une réaction de dés hydroxylation qui entraîne la destruction de la structure cristalline initiale et le fait que le matériau devient amorphe. La présence de métakaoline se présente sous la forme d'une suspension ou d'une forme pulvérulente [34].

### **II.6.2.3- Fumée de silice :**

La fumée de silice également appelée micro silice, est extrêmement fine environ de  $0,1 \mu m$ . Les fumés de silice se sont des sous produits de la fabrication du silicium ou de Ferrosilicium. Les particules ont des propriétés pouzzolanique et sont principalement composés de silice amorphe ( $>85\%$ ). Les fumés de silice se forment lorsqu'un quartz très pur est réduit par le processus de réduction dans un four à arc, on chauffe du charbon à une température de  $2000^{\circ}C$  [24].



**Figure. II. 6 :** Fumée de silice

### II.7-Classification de la pouzzolane

Elles sont classées suivant :

- **Leur activité :** trois groupes distincts de pouzzolane
  - Pouzzolane hautement activée : fumée de silice.
  - Pouzzolane moyennement activée :  
Les cendres volantes pauvres en calcium (cendres volants siliceuse).  
Pouzzolane naturelle tels que : verre volcanique, tufs volcanique, terre à diatomée.
  - Pouzzolane faiblement actives : scories cristallines [37].
- **Leur nature de provenance :**
  - Pouzzolane naturelle d'origine volcanique : verre volcanique, tufs volcanique, rhyolite, zéolite
  - Pouzzolane naturelle d'origine sédimentaire : La gaize, tripolis, terre à diatomée.
  - Pouzzolane artificielles :
    - Roches traite thermiquement : argile, schiste, latérite.
    - Briques et tuiles pulvérisées (tuileaux)
    - Déchets industriels [37].

### II.8-Activité pouzzolanique

L'activité pouzzolanique est la capacité d'un matériau à fixer l'hydroxyde de calcium qui durcit sous l'eau à des températures ordinaire et en temps raisonnable pour donner des hydrates analogues de ceux du ciment portland. La fixation de l'hydroxyde de calcium apparait dans des propriétés variables pour les matériaux qui sont riches en silice libre qu'ils soient d'origines naturelles (gaize, diatomites, cendres volantes) ou crée artificiellement (fumée de silice, cendres volantes, argile calcine, cendres de balles de riz).

Deux caractéristiques distinctes qui définissent l'activité pouzzolanique :

- La quantité totale de l'hydroxyde de calcium qu'une pouzzolane peut fixer.
- La vitesse à laquelle la pouzzolane fixe l'hydroxyde de calcium.

Selon la définition, toutes les matériaux pouzzolanique mentionnés ci-dessus ont la capacité de réagir avec l'hydroxyde de calcium en présence d'humidité pour générer des composes ayant des propriétés contenant un ligand, l'effet de l'aluminium et de la silice il ne faut pas il faut oublier que la silice contribue au mélange en fixant les chaux et que la chaux et l'aluminium augmente la résistance mécanique du matériau à court terme [36].

### II.9-Les propriétés de la pouzzolane

La pouzzolane est constitue de pourcentage élevée allant jusqu'a 70-80% de silice et d'alumine, puis en fer et en alcalins, en magnésie et en chaux donc elle est considéré comme une roche acide.ces éléments contenus ont un effet sur les propriétés du ciment tels que [34] :

#### II.9.1-Propriétés chimiques

En présence de quantité considérable de la chaux avec l'eau, les constituants actifs réagissent pour former les hydrates stables peu solubles et résistants à long terme. Les réactions d'hydratation du ciment et la pouzzolane donnent [34]:



#### II.9.2-propriétés physiques de remplissage :

En plus de ce que nous avons évoqué, la pouzzolane contribue à réduire la perméabilité et augmenter la compacité en remplissant les pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires [34].

### **II.10-L'effet de la pouzzolane**

La pouzzolane affecte de plusieurs propriétés physiques et mécaniques.

**II.10.1- à l'état frais :** la pouzzolane aide à améliorer la durabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité est suivie d'une réduction de la tendance au ressuage et avec la réduction de la chaleur d'hydratation, cette effet contribue à réduire l'apparition de fissures [30].

**II.10.2- à l'état durci :** la pouzzolane augmente la force de la cohésion interne et la compacité de la pate de ciment, il en résulte une réduction de la porosité qui affecte positivement la matrice cimentaire.

- Accroissement de la résistance finale.
- Légère diminution du retrait et de fluage.
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agression chimique.
- Protection des armatures contre la corrosion.
- Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.
- Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces exposées de béton.
- Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces [30].

### **II.11-L'intérêt d'utilisation de la pouzzolane**

#### **II.11.1- L'intérêt écologique et environnemental :**

Grace aux certains études, environ une tonne de CO<sub>2</sub> est produit lors de la production d'une tonne de ciment, ce qui provoque des émissions de carbone dans la planète. Nous devons donc travaillé pour trouver une solution pour réduire ces émissions et leurs risques. Donc le but de remplacement de certaine quantité de ciment par la pouzzolane est la fabrication d'un ciment non polluant en réduisant les émissions [38].

#### **II.11.2-L'intérêt économique :**

L'ajout d'additifs à la fabrication du ciment est un facteur bénéfique puisque la consommation d'énergie du clinker, qui en consomme une quantité important d'énergies, diminue avec le taux d'additions, entrainement une diminution de la consommation totale d'énergie. Dans les pouzzolanes naturelles se produisant, elle n'est pas nécessaire de les broyer ou de les

## **Chapitre II : L'ajout minéral actif « la pouzzolane »**

---

soumettre à un traitement thermique avant de les utiliser. Pour faire des assaisonnements au portland. C'est à raison pour la quelle certains nations, dont les romains utilisent [38].

### **II.11.3-L'intérêt technique :**

La pouzzolane comme ajout est joue un rôle technique important grâce à l'obtention d'un ciment aux propriétés distinctives. Que celles d'un ciment portland, elle augmente également la résistance du ciment aux attaques chimiques [38].

### **II.12- les inconvénients de l'utilisation de la pouzzolane**

- Retard de prise.
- Résistance à la compression jeune âge plus faible.
- Murissement plus long.
- Résistance à l'écaillage controversée.
- Le broyage et le transport très cher [39].

### **Conclusion :**

Le ciment est l'un des matériaux le plus utilise dans la construction, mais à lors de fabrication des quantités importante de CO<sub>2</sub> sont libérées ce qui est nocif pour la planète et aux humains.

L'utilisation de la pouzzolane dans la production de ciment pour créer de nouveaux liants témoigne de la réduction de l'impact environnemental car elles offrent des avantages supplémentaires tels que des économies d'énergie et la préservation des ressources naturelles par rapport au ciment portland.

**Chapitre III**  
**Processus**  
**expérimental**

# CHAPITRE III : PROCESSUS EXPERIMENTAL

## Introduction :

Ce chapitre se concentre sur l'étude expérimentale de l'effet de pouzzolane sur les propriétés physiques, mécaniques du ciment. Dans ce travail expérimental nous avons préparé des ciments composés fabriqués avec des divers pourcentages de pouzzolane naturelle

Cette étude a été effectuée dans les laboratoires de contrôle qualité de l'usine Mefth et du centre d'études et de technologie et de services de l'industrie des matériaux de construction à Boumerdas "CETIM"

## III.1- Matériaux utilisés

**III 1.1- L'appareil de fluorescence X (ou spectromètre de fluorescence X) :** est un instrument utilisé pour l'analyse élémentaire des matériaux. Il fonctionne en excitant les atomes d'un échantillon à l'aide de rayons X, ce qui provoque l'émission de rayons X caractéristiques de chaque élément présent dans l'échantillon. Ces rayons émis sont ensuite détectés et analysés pour déterminer la composition élémentaire du matériau.

L'appareil de fluorescence X est couramment utilisé dans divers domaines, notamment la géologie, la métallurgie, l'archéologie, et le contrôle de qualité dans l'industrie. Il est apprécié pour sa rapidité, sa précision et sa capacité à analyser des éléments en faibles concentrations.

**III 1.2- Le ciment :** Le ciment utilisé est le ciment portland CEMI. Il est composé principalement d'une teneur minimale en clinker de 95% et un maximum de 5% de gypse. Le clinker utilisé pour la fabrication de CEMI provenant de la carrière de l'usine. Sa composition chimique est donnée dans le tableau 1.

**Tableau III. 1:** Composition chimique du clinker

Elément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	PAF
Teneur en %	22,72	5,35	2,37	65,64	0,97	0,36	0,71	0,21	0,19	1,19

**III 1.3-La pouzzolane naturelle :** apportée du gisement de Bouhemidi de Béni-Saf dans la région occidentale de l'Algérie. Sa composition chimique effectuée par fluorescence X est reportée au tableau 2

## Chapitre III : processus expérimental

**Tableau III. 2:** Composition chimique de la pouzzolane

Elément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	PAF
Teneur en %	45,13	15,5	8,04	10,59	4,22	0,15	1,65	1,88	0,15	9,54

**III 1.4-Le sable :** le sable utilisé est un sable normalisé CEN EN 196-1 de nature siliceuse, à grains arrondis, dont la teneur en silice est égale à 98%. Il est délivré en fractions mélangées en sacs plastiques d'un contenu de 1350 g ± 5 g. Sa composition chimique est présentée au tableau 3

**Tableau III. 3 :** Composition chimique du sable

Elément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	PAF
Teneur en %	2.4	0.77	0.27	44.69	1.90	42.4

**III 1.6- l'eau de gâchage :** l'eau utilisée est l'eau du robinet stockée dans une citerne afin de maintenir la température appropriée 20°C± 2°C, Sa composition chimique est présentée au tableau suivant

**Tableau III. 4 :** Composition chimique de l'eau de gâchage

Elément	Cl	SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	CO <sub>3</sub> H	CO <sub>2</sub>	PH
Teneur en %	130	189,8	84	52	141	2,6	7,6

### III.2- Préparation des échantillons

Le premier échantillon est CEM I 42,5 N, Ce ciment a été fabriqué dans le laboratoire de l'usine spécifiquement pour cette étude expérimentale où il est utilisé comme ciment témoin afin qu'il ne contienne aucun ajout, sauf le gypse. Les 4 échantillons contenant la pouzzolane naturelle notée PZN (15% ; 20% ; 30% et 35%) sont élaborés selon quatre combinaisons reportées dans le tableau suivant :

## Chapitre III : processus expérimental

Tableau III. 5 : Les combinaisons du ciment

Notation	Clinker portland %	Pouzzolane naturelle%	Gypse %
CEMI	95 %	0 %	5 %
PZN15	80 %	15%	5 %
PZN20	75 %	20 %	5 %
PZN30	65 %	30 %	5 %
PZN35	60 %	35 %	5 %

Tableau III. 6 : Les analyses chimiques des cinq ciments préparés par fluorescences X

Elément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
CEM I (témoin)	21,29	5,03	3,70	64,32	1,30	0,83	0,68	0,26	0,15	0,18
PZN 15%	25,10	6,90	4,64	55,28	1,79	0,62	0,81	0,54	0,46	0,26
PZN 20%	25,73	7,23	4,82	53,62	1,86	0,84	0,84	0,59	0,50	0,27
PZN 30%	28,28	8,51	5,55	46,95	2,25	0,72	1,01	0,80	1,26	0,34
PZN 35%	29,21	8,95	5,75	45,92	2,31	0,52	0,96	0,86	0,81	0,35

### III.3-Méthodes physiques

#### III.3.1- Mesure de la surface spécifique par la méthode Blaine :

##### III.3.1.1-Définition

Cette technique décrit comment déterminer la finesse de mouture du ciment sous forme de surface spécifique, exprimée en  $\text{cm}^2/\text{g}$ . par le BLAINE manuel ou le Perméabilimètre semi automatique. Plus la surface spécifique est importante plus le broyage est fin [40].

##### III.3.1.2-Principe

Le principe de cette méthode est basé sur la perméabilité d'une poudre à l'air. Il s'agit de mesurer le temps nécessaire à un volume d'air connu pour passer à travers la poudre, plus la durée est longue plus la surface est importante.

La méthode Blaine implique l'utilisation d'un dispositif appelé Perméabilimètre de Blaine, qui se compose d'une cellule où l'échantillon à tester est placé et d'un manomètre composé d'un tube en verre en forme de U rempli à son niveau inférieur avec de l'huile légère. Le fond de la cellule est équipé d'une grille. Le piston est utilisé pour comprimer l'échantillon dans la cellule selon un volume spécifique.

##### III.3.1.3 Mode opératoire

- Peser la masse de l'échantillon à tester
- Placer la grille au fond de la cellule,
- Appliquer sur cette grille, au moyen d'une tige à face inférieure plane et d'équerre, un disque neuf de papier filtre
- Verser l'échantillon dans la cellule à l'aide d'un entonnoir
- Donner une légère vibration à la cellule pour niveler la couche supérieure du ciment
- Mettez un autre disque de papier filtre dessus.
- Appuyez soigneusement avec le piston, en évitant la remontée de la poudre au-dessus du papier filtre jusqu'à ce que le collier vienne buter contre le haut de la cellule.
- Retirer le piston lentement.
- Enduire de vaseline la partie rodée de la cellule et la placer sur son ajustage en lui imprimant un léger mouvement de rotation pour répartir la vaseline.
- Veiller au cours de ce processus à ne pas altérer le tassement de la couche.

## Chapitre III : processus expérimental

---

- Aspirer lentement au moyen de la poire l'air du tube jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le trait supérieur
- Quand la cellule est en place, Appuyer sur la touche entrée de l'appareil qui déterminera automatiquement la SSB pour lancer l'essai
- Reprendre la valeur du SSB (NA 442/2013)

**Expression de la surface spécifique est calculée par la formule :**

$$S = K * (\sqrt{e} (3) * \sqrt{t}) / (p * (1 - e) * \sqrt{n}).$$

K= constante de l'appareil.

e= porosité de la couche tassée (e= 1 - (m / (p\* v))

t= temps mesuré en secondes

p= densité réelle (pour sa détermination, se reporter au manuel des essais)

n= viscosité de l'air à la température d'essai (en poise)



**Figure. III. 1: Appareil de SSB**

### III.3.2- Mesure des refus par tamisage alpine

#### III.3.2.1-Définition

Cette méthode permet de contrôler la finesse du ciment et d'évaluer le degré de broyage en mesurant le pourcentage des particules non passantes à travers le tamis alpin [41].

#### III.3.2.2-Principe

Consiste à tamiser l'échantillon de ciment à travers un tamis spécifique, généralement de 45 µm, retenir les particules non suffisamment broyées, les peser, et calculer le pourcentage de refus

## Chapitre III : processus expérimental

---

### III.3.2.3-Mode opératoire

- Sécher l'échantillon à tamisé si nécessaire
- Connectez le tamis "au bouton d'allumage à l'arrière de l'appareil Alpine
- Insérer le tamis sur le carter.
- Peser  $10 \pm 0.2$  g de produit à tamiser
- Disperser la masse de l'échantillon pesé sur le tamis et poser le couvercle
- Commencez à tamiser en réglant le temps 1 minute (2000Pa)
- Lorsque le tamisage est terminé, appuyer sur la touche « stop »
- Démonter le couvercle et peser le refus « m » (NA 442/2013)

### Expression des résultats :

$$\% \text{Refus} = \frac{m_2}{m_1} * 100$$

### Avec :

$m_1$  : la masse initiale pesée

$m_2$  : la masse retenu après le tamisage

### III.3.3- Préparation de la pâte normale :

Cette opération consiste à préparer une pâte normale pour réaliser les essais d'expansion et pour mesurer le temps de prise. L'opération utilise un malaxeur et on procède comme suit :

- Le malaxeur étant en position de fonctionnement, verser dans le récipient, la quantité d'eau préalablement déterminée par des tâtonnements successifs de manière à obtenir la consistance normale.
- Ajouter 500g de ciment pour remplir le moule tronconique et démarrer le malaxeur à une vitesse lente pendant 90s.
- Arrêter le malaxeur pendant 30s et enlever, au moyen d'une raclette en plastique, toute la pâte de ciment adhérant aux parois du bol et placer cette pâte au milieu du bol.
- Reprendre le malaxage pendant 90s à vitesse lente.
- Le temps total de fonctionnement du malaxeur doit être de 3 min (plus 30s d'arrêt).

Dans ce travail, nous avons suivi la norme algérienne relative aux liants hydrauliques – spécifications (NA 442/2013).

## **Chapitre III : processus expérimental**

---

### **III.3.1-Confection de l'éprouvette :**

- Mettre la pâte dans le moule tronconique immédiatement, préparer et araser la surface avec une truelle placée perpendiculairement à la surface et déplacer avec un mouvement de scie de faible amplitude.
- Le moule rempli de pâte normale peut être immergé dans l'eau ou placé dans une l'armoire humide (NA 442/2013).

### **III.3.2-Vérification de la consistance normale :**

- Après avoir équipé l'appareil de Vicat d'un plateau nu, équipé d'une sonde de consistance, il est nécessaire de placer immédiatement le moule rempli de pâte dans la grille de la sonde, de laisser la pâte descendre perpendiculairement à la surface de la pâte et de la maintenir à son contact. Sélectionner une période d'arrêt puis laisser l'Utiliser la sonde pour mesurer l'épaisseur de la pâte une fois que celle-ci de descendre sous son propre poids (pour les ciments à très fine mouture, la descente de la sonde peut être assez longue).
- Il est important de ne jamais effectuer deux essais de consistance sur la pâte dans un même moule (NA 442/2013).

### **III.3.4-Essai d'expansion**

#### **III.3.4.1- Définition :**

Est réalisé sur la pâte normale pour déterminer la stabilité de la pâte de ciment selon les spécifications de la norme algérienne 442/2000 et en utilisant l'aiguille Le Chatelier.

La valeur de l'expansion ne doit dépasser de 10 mm donc :

- Si l'expansion mesurée est inférieure ou égale à 10 mm, cela indique que le ciment est stable et de bonne qualité.
- Si l'expansion dépasse 10 mm, cela signifie que le ciment est expansif et peut poser des problèmes de fissuration dans le béton.

#### **III.3.4.2-:Technique de l'essai**

- **Vérification initial des aiguilles Le Chatelier :**

Avant de procéder à chaque essai, est important de s'assurer que les deux bords de la fente ou des points quelconque des deux aiguilles ne sont pas soumis à une pression opposée.

## **Chapitre III : processus expérimental**

---

### **➤ Préparation des éprouvettes et mise en place dans le bain définitif :**

Il faut placer les moules sur des plaques de verre, les remplir de pâte pure et les recouvrir de deux plaques de verre légèrement lestées. Ensuite, il faut les immerger immédiatement dans l'eau à une température de 20°C (1°C).

Après au moins 24 heures de gâchage et en tout cas pas plus de 24 heures après la phase ou un échantillon de la même pâte conservé dans la même eau peut supporter sans déformation une pression de pouce, il est important de retirer les plaques de verre avec précaution et de mesurer l'écartement des points des aiguilles.

Ensuite, il est nécessaire de placer les moules verticalement dans leur bain destiné à leur utilisation définitive (NA 442/2013).

### **➤ Essai d'expansion à chaud :**

- Les moules sont immergés dans l'eau que l'on fait bouillir progressivement en un temps compris entre un quart d'heure à une demi-heure.
- Une fois qu'il a bouilli, pendant 3 heures successives, on mesure à nouveau l'écartement final des points des aiguilles sans attendre le refroidissement.
- Si les liants contiennent plus de 3% de magnésie, la phase de bouillonnement est prolongée jusqu'à ce qu'aucune augmentation de l'expansion ne soit observée en deux heures.

### **III.3.5-Détermination du temps de prise**

#### **III.3.5.1-Objectif :**

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.

#### **III.3.5.Le principe:**

Le temps de début de prise est l'instant où l'aiguille cesse de s'enfoncer et s'arrête à une distance du fond du moule supérieur à 2.5 mm. Le temps de début et de fin de prise de ciments ont été déterminés à l'aide d'un prisomètre de VICAT (NA 442/2013).

## **Chapitre III : processus expérimental**

---

### **III.3.5.3- Technique des essais**

#### **III.3.5.3.1-Détermination de 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 abandonnée elle-même sans vitesse initiale.
- Observez le déplacement de l'aiguille, les observations sont répétées jusqu'à ce que vous constatiez le début de la prise.
- Ces diverses observations sont réalisées sur un moule immergé ou extrait de l'environnement de conservation pendant une durée de 5 minutes et à différents endroits.
- Il est nécessaire d'avoir des points de mesure à une distance d'au moins 1.5 cm de la paroi du moule et de 2 cm entre eux (NA 442/2013).

#### **III.3.5.3.2- Détermination de fin de prise :**

Au moment où l'aiguille cesse de s'enfoncer et s'arrête, elle se trouve à une distance inférieure à 2 mm de la face supérieure du moule tronconique rempli de la pâte normale (NA 442/2013).

## **III.4-Méthodes mécaniques**

### **III.4 .1- Détermination de la résistance mécanique par flexion et par compression :**

#### **III.4 .1.1- Définition :**

Les essais de flexion et de compression permettent de déterminer la contrainte de rupture à la traction par flexion et la contrainte de rupture à la compression des liants hydrauliques. L'éprouvette utilisée dans l'essai de flexion est une éprouvette prismatique (4\*4\*16 cm) en mortier normal ou en pâte normale (les éprouvettes 4\*4\*16 cm doivent être sorties de l'eau moins de 15 mn avant les essais. Elles sont alors essuyées avec un chiffon propre). La rupture est effectuée sous charge concentrée dans une machine munie d'un dispositif comportant trois appuis.

L'essai de compression est exécuté, avec une presse pour matériaux durs, sur les demi-éprouvettes provenant de l'essai précédent (si l'essai de compression a lieu plus de 20 mn après celui de flexion, conservez entre temps les demi-éprouvettes dans l'armoire humide). Les essais sont normalement exécutés sur des éprouvettes en mortier normal.

Les contraintes de rupture à la traction par flexion et de rupture par compression sont mesurées sur 3 éprouvettes rompues par flexion et sur les 6 demi-éprouvettes résultantes rompues par compression.

## **Chapitre III : processus expérimental**

---

Il est recommandé autant que possible d'éviter d'avoir à chaque âge, plus de 2 éprouvettes d'une même gâchée.

### **III.4.1.2-Préparation des éprouvettes :**

Le mortier normal est composé d'une mesure de liant à tester, de trois mesures de sable normal et d'une demi-mesure d'eau (règle E/C=0.5). Le poids de composants est pesé avec une précision de 0.5%.

Pour la préparation de trois éprouvettes, les quantités sont :

1. Sable normal sec : 1350g.
  2. Liant : 450g.
  3. Eau : 225g.
- Nous mélangeons les matériaux à laide d'un malaxeur mentionné dans la norme algérienne 442/2000.
  - Mise en place de l'eau dans le récipient, après incorporer le liant.
  - Démarrer le malaxeur à une vitesse lente pendant une minute, au bout des 30 dernières secondes, on ajoute le sable et augmenter la vitesse de malaxeur pendant une durée de 2 minutes.
  - Après avoir arrêté le mouvement pendant 90 seconds, démonter le batteur de son axe et racler les parois et le fond du récipient de manière à ce qu'aucune partie du mortier ne s'échappe du malaxage.
  - Une fois le malaxeur remonté, recommencez le malaxage pendant 2 minutes à une vitesse rapide.

### **III.4.1.3-Le moulage :**

- 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 et la partager en 6 fractions sensiblement égales.
- Fixer le moule muni de hausse sur la table à chocs et introduire dans chacun des 3 compartiments, une fraction de la galette; égaliser la surface du mortier au moyen de raclette maintenue verticale en effectuant des allers retours prenant appui sur le bord supérieur de la hausse.
- 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 sont remplis de mortier sur une faible hauteur.

## **Chapitre III : processus expérimental**

---

- Le moule étant retiré de la machine et débarrassé de sa hausse, araser le mortier avec l'arrête d'une règle métallique plate maintenue verticale par un mouvement de scie de faible amplitude et perpendiculaire à la longueur des éprouvettes.
- Inscrire les marques d'identification des éprouvettes sur le moule.
- Le moule rempli de mortier marqué et recouvert d'un couvercle (qui doit laisser un vide de l'ordre de 2 mm au-dessus de la surface des éprouvettes), est placé jusqu'au moment du démoulage dans une enceinte humide à la température de  $20 \pm 1$  °C dont l'humidité relative doit être aussi voisine que possible de la saturation au moins 90% (NA 442/2013).

### **III.4.1.4-Démoulage des éprouvettes prismatiques :**

Le démoulage qui intervient entre les deux périodes de conservation (avant démoulage, d'une part et conservation dans l'eau, d'autre part) est exécuté entre 20 et 24 heures après la mise en moule. Toutefois, si au bout de 24 heures, le mortier n'a pas acquis une résistance suffisante pour qu'on puisse le manipuler sans danger de détérioration, le temps de démoulage est augmenté de 24 heures, mais le compte-rendu doit le mentionner.

Quand il s'agit d'éprouvettes à rompre à 24 heures d'âge, si le démoulage a lieu plus de 20 minutes avant l'essai, les éprouvettes doivent être remises dans l'armoire humide jusqu'au moment de l'essai. Le démoulage doit être effectué avec précaution

### **III.4.1.5-Conservation des éprouvettes dans l'eau :**

Une fois démoulées, 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 de  $20 \pm 1$  °C.

On doit avoir les compositions suivantes :

- Matières en suspension : 0,5%.
- Sels dissous : 2,0 g/l.

### **III.4.1.6-Essai de rupture par flexion :**

- La flexion est réalisée par un dispositif à deux appuis est adapté dans une machine d'essai de la résistance à la flexion permettant d'exercer et de mesurer de faibles charges (inférieur à 1000 N/s) avec une précision de 1% dans le 4/5 supérieur de l'échelle de mesure.
- La charge doit croître progressivement de  $5 \pm 1$  N/s.

## Chapitre III : processus expérimental

---

- La contrainte de rupture par flexion est de 2340 F à 2500 F en fonction de la portée, qui varie entre 100 et 106,7 mm. Elle correspond à la formule de résistance des matériaux. La contrainte R est exprimée en MPa. (NA 442/2013).

### III.4.1.7-Essais de rupture par compression :

- Elle est réalisé par un machine équipée d'un dispositif de compression permettant d'appliquer de charge qui doit croître jusqu'à la rupture à une vitesse telle que l'accroissement de contrainte soit compris entre 1 et 2 MPa/s. toutefois, jusqu'à la moitié de la charge de rupture présumée, la charge peut croître rapidement.
- Chaque demi - éprouvette est essayé en compression sur ses faces latérales de moulage, sous une section de 40 \* 40mm, entre deux plaques de métal dur 10mm d'épaisseur, de 40mm ± 0.1 mm de largeur, de longueur supérieure à 40 mm.
- La demi- éprouvette est placée entre elles de manière que son extrémité intacte dépasse d'au moins 1cm et que les arêtes longitudinales de l'éprouvette soient perpendiculaires à celles des plaques.
- Les plaques sont guidées sans frottement appréciable au cours de l'essai, de manière à avoir la même projection horizontale. L'une d'elles peut s'incliner légèrement pour permettre le contact parfait plaques - faces de l'éprouvette.
- L'ensemble du dispositif et de l'éprouvette est placé entre les plateaux d'une presse répondant aux spécifications des presses destinées à l'essai de compression des matériaux durs. Il y est placé de telle façon que l'axe des sections de compression soit centré sur la rotule du plateau supérieur. u SSB (NA 442/2013)

# **Chapitre IV**

## **Résultats et discussion**

### CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

#### Introduction :

L'objectif de ce chapitre consiste à présenter les résultats des expériences menées dans le cadre de notre recherche, ainsi que des interprétations et des justifications.

#### IV.1-Analyses physiques

##### IV.1.1- Détermination de la surface spécifique par la méthode Blaine :

La mesure de la Surface spécifique Blaine de nos échantillons a donné les résultats indiqués au Tableau IV.1.

Tableau IV. 1 : Résultats de refus

L'échantillon	CEM I 42.5N	PZN15	PZN20	PZN30	PZN35
SSB ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	4800	4980	5000	5110	5200

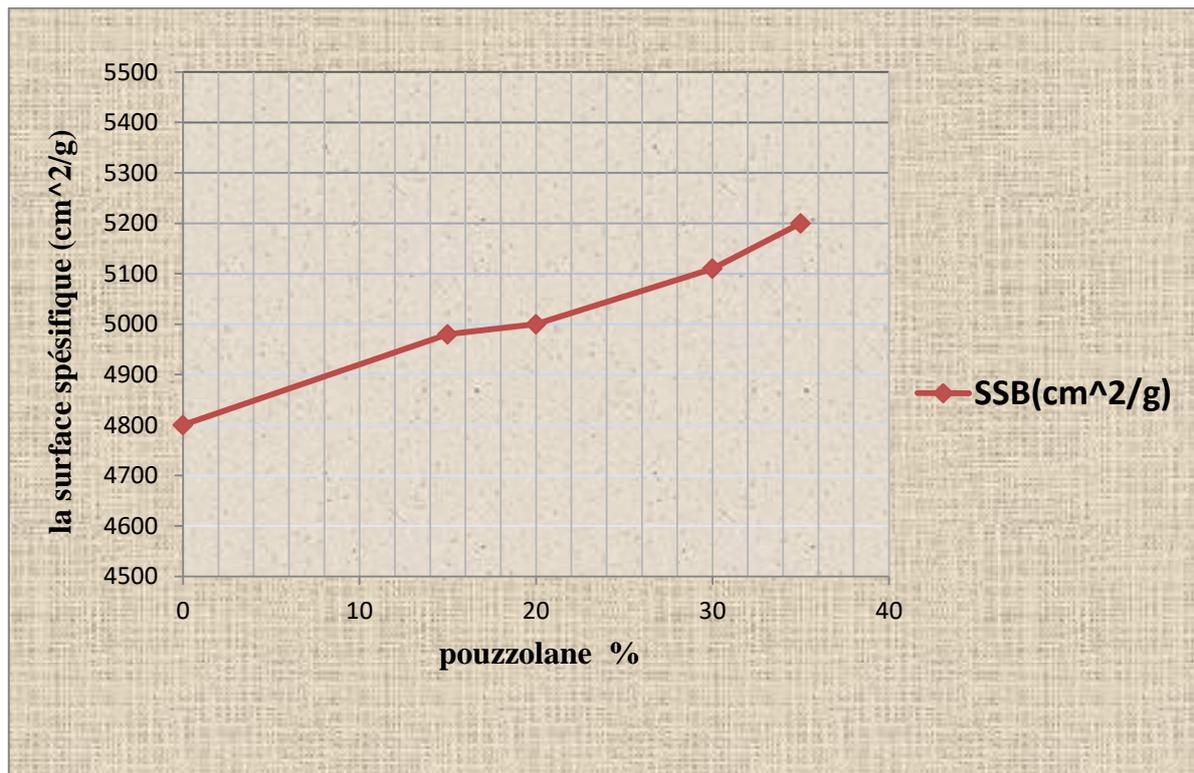


Figure IV. 1: Variation de SSB en fonction du pourcentage de pouzzolane

## Chapitre IV : résultats et discussion

A partir de ces résultats, on observe que la surface spécifique augmente avec le pourcentage de la pouzzolane, la surface spécifique augmente autour de 4900 à 5200  $\text{cm}^2/\text{g}$  comparée au ciment de référence qui a une surface spécifique environ de 4800  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

Nous constatons également que l'augmentation de la surface spécifique de ciment avec 15% de pouzzolane est légère par rapport à l'augmentation de la composition avec 35% de pouzzolane.

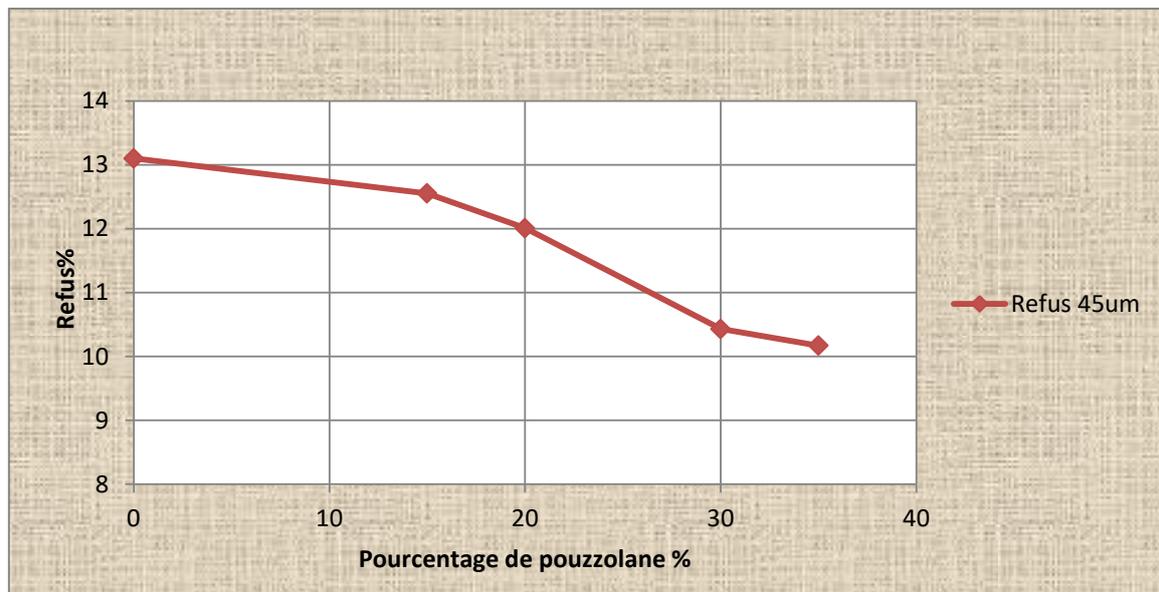
Donc peut conclure que la surface spécifique croît significativement avec l'augmentation de pourcentage de pouzzolane et Cela dû au fait que la pouzzolane est un matériau minéral avec une grande finesse.

### IV.1.2- Refus

D'après l'essai effectué avec un tamis de 45  $\mu\text{m}$ , les résultats de refus sont notés dans le tableau suivant :

**Tableau IV. 2** : Résultats de refus

L'échantillon	CEM I 42.5N	PZN15	PN20	PZN30	PZN35
Refus	13,1	12,552	12,01	10,43	10,17



**Figure IV. 2** : Variation de refus en fonction du pourcentage de pouzzolane

## Chapitre IV : résultats et discussion

Selon les résultats indiqués dans la figure IV.2, nous trouvons que le refus des ciments fabriqués avec des proportions variables d'ajout de pouzzolane (15%, 20%, 30%, 35%) sont plus faible que celui de ciment (CEM I) témoin.

Le ciment avec des taux d'ajout plus élevés (30% et 35%) a tendance à avoir un refus plus faible que ceux avec des taux plus faibles (20% et 15%).

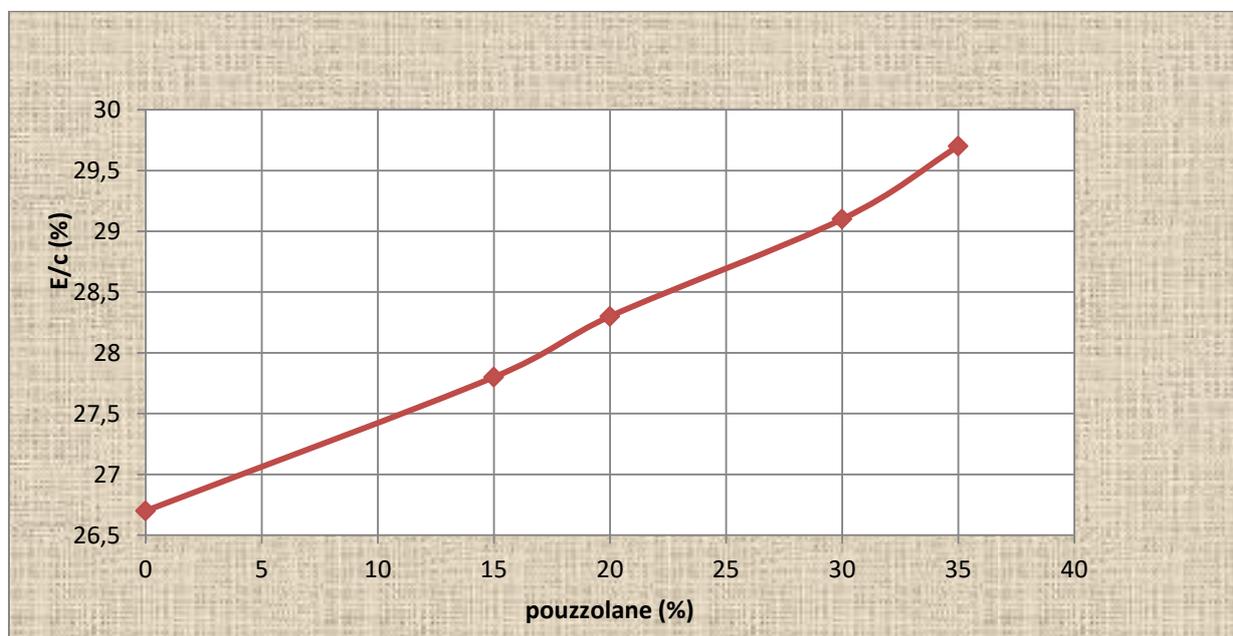
L'augmentation des taux de pouzzolane utilisé réduit considérablement le refus de ciment, cela signifie que l'ajout de pouzzolane modifie la composition chimique et le volume de grain du ciment, ce qui peut affecter le comportement de refus.

### IV.1.3- Influence de la pouzzolane sur la consistance normale :

Ce tableau présente la variation de la consistance normale lorsqu'on augmente le pourcentage de la pouzzolane.

**Tableau IV. 3** : Résultats de consistance normale

L'échantillon	CEM I 42.5N	PZN15	PN20	PZN30	PZN35
E/C (%)	26,6	27,8	28,3	29,1	29,7



**Figure IV. 3** : Variation du rapport E/C en fonction du pourcentage de la pouzzolane

## Chapitre IV : résultats et discussion

---

La figure IV.2 indique que le besoin de ciment pour l'eau de gâchage augmente avec l'augmentation de la quantité de pouzzolane ajoutée pour avoir une pâte normale des différents mélanges.

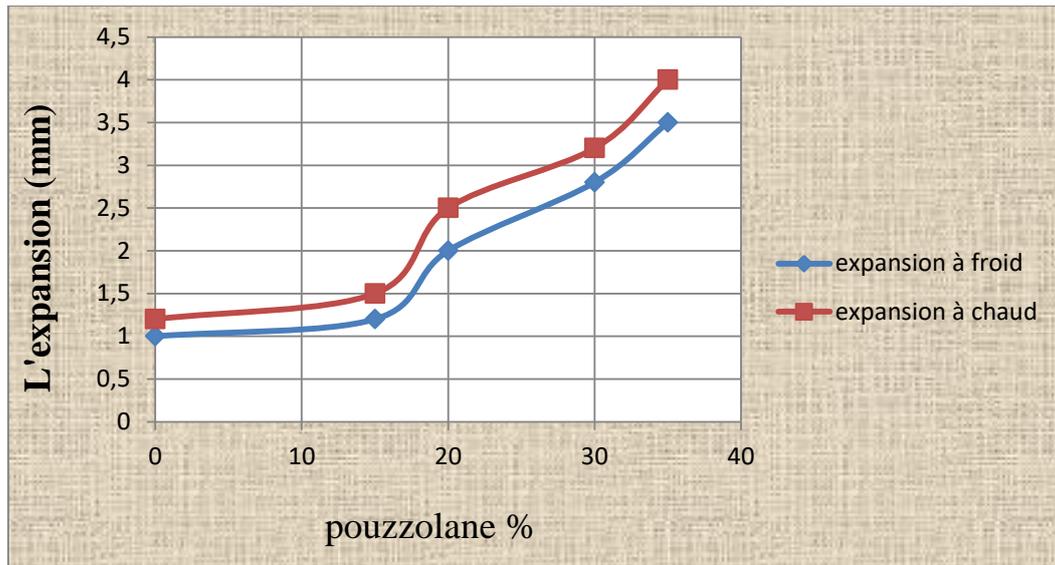
Ces résultats sont dus à deux facteurs qui sont la finesse du ciment et l'absorption des ajouts. On sait que la finesse d'un ciment représente la surface à entourer par les molécules d'eau, lorsque la finesse est grande donc la surface à mouiller est plus importante, d'où un rapport E/C plus élevé. De plus, la pouzzolane est connue par son pouvoir absorbant des molécules d'eau.

### IV.1.4- Expansion (la stabilité) :

Ce tableau représente les résultats de la variation de l'expansion avec l'accroissement du pourcentage de pouzzolane.

**Tableau IV. 4** : Résultats de l'expansion

L'échantillon	CEM I 42.5N	PZN15	PN20	PZN30	PZN35
L'expansion à froid	1	1,2	2	2.8	3,5
L'expansion à chaud	1,2	1,5	2,5	3,2	4



**Figure IV. 4 : La variation de l'expansion en fonction du pourcentage de la pouzzolane**

Les résultats présentés dans le tableau (IV.4) montrent que l'expansion à chaud augmente avec l'augmentation du pourcentage de pouzzolane. On remarque que dans les pâtes de différents pourcentages de pouzzolane l'expansion augmente de 50 à 100% par rapport à la pâte témoin (CEM 1).

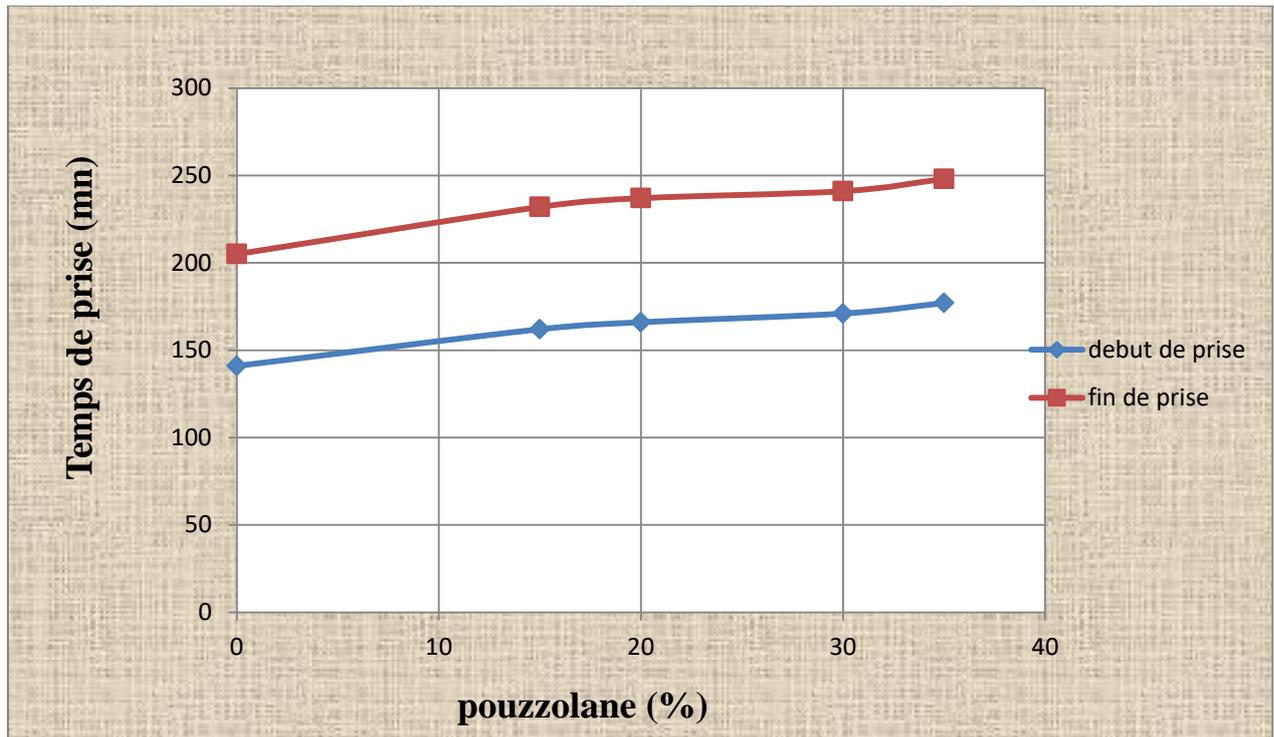
Cette augmentation est due à la présence de certains éléments comme la chaux libre CaO et MgO qui sont néfastes au ciment et qui donnent généralement une expansion plus élevées dans des proportions croissantes.

### IV.1.5- Temps de prise

Ce tableau donne l'évolution de temps du début et fin de prise pour différents pourcentage de la pouzzolane

**Tableau IV. 5 : Le temps de prise**

L'échantillon	CEM I 42.5N	PZN15	PZN20	PZN30	PZN35
Début de prise (min)	141	162	166	171	177
Fin de prise (min)	205	232	237	241	248



**Figure IV. 5 :** Variation de temps de prise en fonction du pourcentage de la pouzzolane

D'après ces essais, on a une augmentation dans le temps de début et fin de prise avec la variation de pourcentage de la pouzzolane.

Lorsqu'on a une augmentation de rapport E/C dans les mélanges préparés c'est ce qui fait une concentration faible de grains solides, ce qui augmente l'espace entre les particules de ciment et donc une faible liaison entre les premiers hydrates formés, d'où il en résulte une hydratation plus faible et donc le temps de prise est plus élevé.

De là nous concluons que l'effet de la pouzzolane retarde d'hydratation de ciment à un retard minimale d'une heure et donc le temps de prise est augmenté par rapport à la pâte témoin qui a une prise plus rapide

## Chapitre IV : résultats et discussion

### IV.2-Analyses mécaniques

#### IV.2.1-Influence de la pouzzolane sur la résistance par flexion

Tableau IV. 6 : La resistance à la flexion

L'échantillon	RF 2J (MPa)	RF 7J (MPa)	RF28j (MPa)
CEM I	6,5	7,1	9
PZN 15	4	6	8,66
PZN20	3,73	5,5	7,92
PZN 30	2,96	5,2	7,22
PZN 35	2,04	4,7	7,03

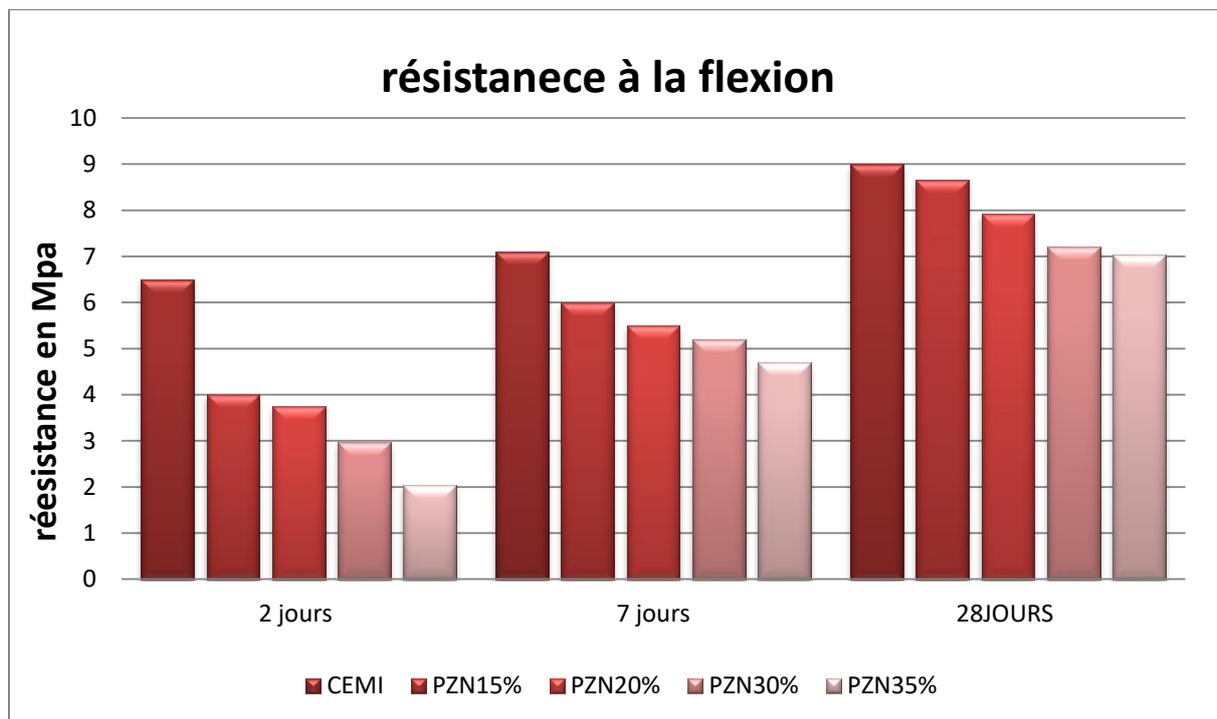


Figure IV. 6 : Evolution de la résistance à l'âge de 2,7et 28 jours

## Chapitre IV : résultats et discussion

Comme indique l'illustration **IV. 6** L'ajout de pouzzolane naturelle dans les mortiers affecte la résistance à la flexion de la manière suivante :

Au jeune âge (2 et 7 jours) on remarque une nette diminution de la résistance à la flexion. Pour un taux en pouzzolane élevée 30% et 35%, la résistance à la flexion à l'âge de 2 jours, diminue de 54.5% et 68.6% respectivement , tandis qu'elle diminue de 38.46% et 42.61% si la substitution en pouzzolane est 15%, 20% par rapport au témoin sans pouzzolane et de la même façon , la résistance des mortiers à l'âge de 7 jours est réduite de 15.49%, 22.43% , 26.76% , 39.3% si les pourcentages de pouzzolane ajouter sont 15%, 20% ,30% ,35% respectivement par rapport ou mortier de référence.

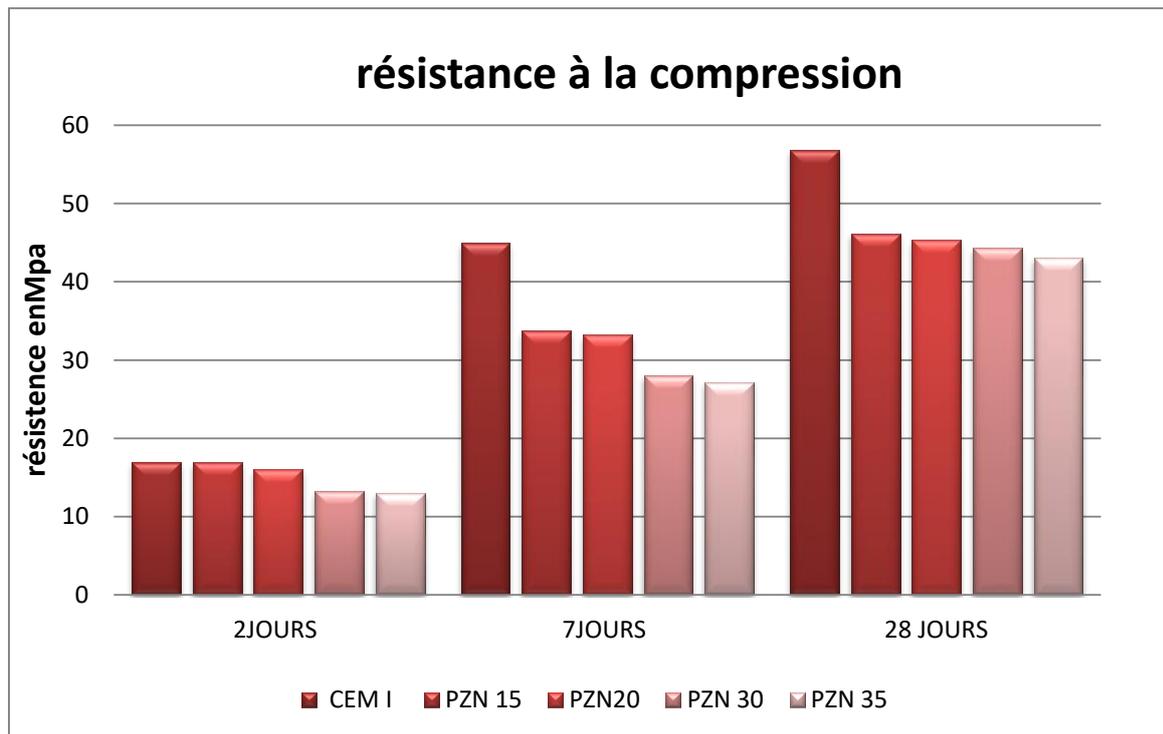
A long terme plus précisément à partir de l'âge de 28 jours. Cependant la résistance mécanique à la flexion reste toujours faible mais elle s'approche de la résistance de référence du mortier sans pouzzolane.

Donc l'incorporation de pouzzolane, surtout à des taux élevés, réduit la résistance à la flexion des mortiers aux jeunes âges (2 et 7) jours par rapport à un témoin sans pouzzolane mais elle s'améliore à long terme. Cela est dû au fait que la réaction pouzzolanique n'est pas prédominante aux premiers jours, conduisant à une hydratation moins intense réduite des minéraux C3S et C2S qui assurent le développement des résistances mécaniques à court et moyen terme.

### IV.2.2-Influence de la pouzzolane sur la résistance par compression

**Tableau IV. 7** : La resistance à la compression

L'échantillon	RC 2J (MPa)	RC7J (MPa)	RC28j (MPa)
CEM I	17	45	56.9
PZN 15	16,96	33,81	46,2
PZN20	16 ,04	33 ,25	45,4
PZN 30	13,26	28,01	44,3
PZN 35	13,08	27,2	43,12



**Figure IV. 7 :** Evolution de la résistance à la compression à l'âge de 2, 7 et 28 jours

Au jeune âge (2 jours et 7 jours) les résistances à la compression des mortiers contenant la pouzzolane naturelle sont faibles par rapport à celle du mortier contrôle (Figure IV. 7). A long terme (28 jours) les mortiers avec 15% et 20% de pouzzolane peuvent atteindre des niveaux de résistance à la compression considérablement accrue par rapport à ceux du mortier sans pouzzolane et représentent 81.19% et 79.78 % respectivement. On peut expliquer cela par la formation continue de produits de réaction pouzzolanique.

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous n'avons conclu que l'ajout de pouzzolane naturel à un impact sur les propriétés physiques et mécaniques du ciment (la surface spécifique, refus, la consistance, le temps de prise, l'expansion et la résistance mécanique). Lorsque la pouzzolane est ajoutée au ciment, cela augmente la surface spécifique et la consistance. De plus le temps de prise augmente et la résistance à la compression et par flexion augmente avec l'âge de durcissement et diminue lorsque on augmente les pourcentages d'ajouts

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

---

### **CONCLUSION GENERALE**

Au terme de cette étude destinée à connaître l'effet de pouzzolane sur les propriétés physiques et mécaniques du ciment, nous avons tiré les conclusions suivantes :

#### **Physiquement**

- la pouzzolane permet d'augmenter significativement la surface spécifique des ciments, plus la surface spécifique est grande plus la surface des grains de ciment en contact avec l'eau est importante lors du gâchage ce qui accélère l'hydratation
- L'utilisation du pouzzolane comme ajout dans la fabrication du ciment tend à diminuer le refus par rapport au ciment standard CEM I, avec des variations selon le pourcentage d'ajout utilisé. Les ciments avec des taux d'ajout plus élevés présentent généralement un refus plus faible que ceux avec des taux plus bas
- La demande de ciment en eau augmente avec l'augmentation de la proportion de pouzzolane principalement en raison de sa surface spécifique élevée et de sa capacité d'absorption.
- la pouzzolane naturelle engendre l'augmentation de temps de début et fin prise des pâtes de ciment. Elle provoque aussi une augmentation légère de l'expansion qui peut être expliquée par la présence d'impuretés ainsi que d'autres éléments tels que la chaux libre et le MgO qui sont préjudiciables au ciment.

#### **Mécaniquement**

- La pouzzolane a un effet négatif sur la résistance au jeune âge, mais cet effet s'inverse à long terme, cet effet négatif est lié à la cinétique plus lente de la réaction pouzzolanique

A la fin de ce travail on peut dire que la pouzzolane a un effet positif sur le ciment, ses propriétés physiques ou même mécaniques avec un optimum autour de 15 % de substitution du ciment.

# **Bibliographie**

## Bibliographie

---

### Bibliographie

- [1] Mekkaout Fatiha; « amélioration de la vitesse d'hydratation et de durcissement d'un ciment pouzzolanique par l'utilisation d'accélérateurs de prise » ; mémoire de magister ; département de chimie université des sciences et de la technologie d'Oran mohamed boudiaf ; 2011
- [2] <https://www.lafarge.fr/fabrication-du-ciment> (Date de consultation : 09.02.2024)
- [3] Djekrif daoud, Benchikh abd elouahab ; «étude de comportement physique et mécanique du mortier et béton a base des ciments ternaires» ; mémoire de master ; département génie civil ; université mohammed khider –biskra ; 2013
- [4] Narimene tebina ; « impact finesse de ciment sur le temps de prise et le durcissement du mortier» ; mémoire de master ; département de chimie industrielle ; université mohammed khider –biskra ; 2022.
- [5] Claudine Noguera ; «actualités techniques et industrielles les argiles : des nanomatériaux modernes, au passé millénaire» ; cnrs-upmc institut des nanosciences de paris, umr 7588, 140 rue de Lourmel, 75015 paris, France ; *image (Rochester, n.y.)*, pp. 98–101, 2010.
- [6] khenkhar mohamed islam ; «les procédés d'enrichissement et mise en tas du minerai de fer de l'ouenza» ; *stage effectué au sein Renault tanger* ; département de génie minier mémoire ; école nationale polytechnique ; 2018.
- [7] <https://construction-maison.pagesjaunes.fr/astuce/voir/617185/les-differents-types-de-sable> (Date de consultation : 06.02.2024)
- [8] <https://civiltoday.com/civil-engineering-materials/cement/81-cement-definition-and-full-details> (Date de consultation : 10.02.2024)
- [9] <http://doc.lerm.fr/la-fabrication-du-ciment-courant/> (Date de consultation: 13.02.2024)
- [10] A. Prax ; «mémento substances utiles (matériaux de carrière) clinker portland (matières premières utilisées pour la fabrication du ciment » ; département matériaux b.p ; bureau de recherches géologiques et minières ; no. 38, 1979.
- [11] Cherifa guers, feriel Bounia ; «effet des ajouts cimentaires sur les propriétés physiques et mécanique du mortier» ; département de génie civil ; laboratoire de géo matériaux et génie civil ; université de Blida 1 ; 2020.

## Bibliographie

---

[12] Chibani Younes ; «étude de l'effet des agents de mouture sur la durabilité des mortiers» ; mémoire de master ; département de génie des procédés ; université de Blida ; 2016

[13] Seddiki abdelwahhab ; «étude comparative entre un ciment à composition classique et un ciment laitier» ; mémoire de master ; département des mines et de la géotechnologie ; institut des mines ; université Larbi Tebessi – Tébessa ; p. 89, 2022.

[14] <https://www.infociments.fr/ciments/fabrication-du-ciment-le-process>

(Date de consultation : 15.02.2024)

[15] Haboul Samia ; «étude de l'influence du gypse et de la pouzzolane sur les propriétés du ciment» rapport de soutenance de licence professionnalisant ; institut de technologies ; université Akli Mohand Oulhadj-Bouira; 2018.

[16] S.ressam ; «influence de la température du clinker et du tuf sur le procédé de broyage du clinker a ciment» ; mémoire de master ; faculté des sciences de l'ingénieur ; université Saad Dahleb Blida ; 2011.

[17] <http://doc.lerm.fr/lhydratation-du-ciment-portland/> (Date de consultation: 17.02.2024)

[18] <https://theconstructor.org/concrete/cement-setting-time-stages-processes/7573/?amp=1>

(Date de consultation : 17.02.2024)

[19] <https://pavementinteractive.org/reference-desk/materials/portland-cement/heat-of-hydration/> (Date de consultation : 18.02.2024)

[20] <https://testbook.com/civil-engineering/fineness-of-cement>

(Date de consultation: 18.02.2024)

[21] Itim Ahmed, Ezziane Karim, Kadri el hadj ; «étude des déformations de retrait d ' un mortier contenant différentes additions minérales» ; laboratoire de Geomateriaux, université Hassiba Benbouali Chlef, Algérie ; laboratoire l2mgc, université de Cergy pontoise, France ; 2010

## Bibliographie

---

[22] nahla Ziat ; «étude des caractéristiques physiques et mécaniques du ciment portland» ; rapport de soutenance de licence professionnelle ; département de technologie chimique industrielle ; université Akli Mohand Oulhadj-Bouira ; 2020.

[23] Hajar Derouich ; «réactivité de deux variétés cristallines de la phase aluminatetricalcique c3a du ciment en présence ou non de super plastifiant.» ; génie civil ; 2011 fhal-01877916ff.

[24] Djohar geryville ; «étude et amélioration de l'activité pouzzolanique de certains matériaux silicates pour une substitution partielle du clinker dans le ciment portland présenté» ; mémoire de magister; département de chimie; universite des sciences et de la technologie d'Oran – mohamed boudiaf.

[25] <http://dspace.univ-tiaret.dz/bitstream/123456789/11663/2/chapitre%2002.pdf>

(Date de consultation : 21/02/2024)

[26] Bourroubey chahrazed ; «influence de la perlite naturelle sur les résistances mécaniques des mortiers » ; mémoire de master académique ; université Abdelhamid ibn badis de Mostaganem ; 2019.

[27] Mourad Taj Eddine ould mouss ; «influence des ajouts pouzzolonique sur le comportement thermo-physiques des mortiers» ; mémoire de master professionnalisant; civil engineering & architecture département ; University Abdelhamid ibn badis – Mostaganem ; 2020.

[28] Ahmed hadj sadok ; «durabilités des mortiers a base de ciment au calcaire.» ; mémoire de magister ; département de génie civil; université de Saad Dahleb de Blida ; 2004.

[29] Belas belaribi, m. Semcha et l. Laoufi; «influence de la pouzzolane de béni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des bétons» ; no. February, 2016, doi: 10.1139/103-029.

[30] Aouididi Lwiza ; «caractérisation d'un ciment a base de pouzzolane » ; mémoire de master ; département de génie civil; université mohamed boudiaf - m'sila ; 2016.

[31] Larbi chaht Fouzia ; «caractérisation des propriétés thermiques des liants lhydrauliques au jeune age: ciment et pouzzolane.» ; mémoire de magister ; département de génie civil ; université Abdelhamid ibn badis –Mostaganem ;

## Bibliographie

---

- [32] Cherifa guers, feriel Bounia ; «effet des ajouts cimentaires sur les propriétés physiques et mécanique du mortier» ; département de génie civil ; laboratoire de géo matériaux et génie civil ; université de Blida 1 ; 2020
- [33] Rabah chaid ; «formulation, caractérisation et durabilité des bhp aux ajouts cimentaires locaux» ; thèse de doctorat d'état en génie civil ; laboratoire construction & environnement ; département de génie civil ; école nationale polytechnique ; 2006.
- [34] Ben ouira hafsa, bouhali nour elhouda ; «étude de l'influence des ajouts pouzzolanique sur l'évolution de la propriété d'une matrice cimentaire» ; mémoire de master académique; département de génie civil; université mohamed boudiaf - m'sila ; 2017
- [35] Slamani Abdelkader, Mersali Chaouki ; « durabilité des mortiers a base de perlite (10%, 15%, 20%, 25%) aux attaques acides (HCl, h2so4)» ; mémoire de master académique; département of civil engineering ; abdelhamid ibn badis University of Mostaganem ; 2023.
- [36] Belbachir Nasrine ; «étude des propriétés mécaniques a court terme de béton a base de ciment pouzzolanique de synthèse» ; mémoire de magister; département de génie civil; université abdelhamid ibn badis Mostaganem ; 2012.
- [37] Salah Refrafi ; «influence des ajouts sur les caractéristiques physico-mécaniques des mortiers et des bétons» ; mémoire de magister ; département de génie civil; université mohamed khider Biskra.
- [38] Amri Sofiane, Boughanem Akila; «influence de l'ajout de pouzzolane naturelle (tuf) sur la durabilité des pâtes de ciment» ; mémoire de master ; département de génie civil ; université a. mira – Bejaia ; 2019.
- [39] Belhocine aida, Nagoudi nadjet; «étude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux» ; mémoire de master ; département de génie civil et d'hydraulique ; université kasdi merbah - Ouargla ; 2014
- [40] Akacha Imane ; « impact des alcalis sur les performances de ciment » ; mémoire de master ; département de chimie industrielle ; génie chimique ; université mohamed khider Biskra. ; 2020.
- [41] A. Zeitschrift ; p. Link ; e. Dienst and e. eth ; « la surface spécifique, mesure de la finesse du ciment, » 2024.

## Bibliographie

---