

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENE CIVIL

N° :



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE  
FILIERE : GENE CIVIL  
OPTION : MATERIAUX

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Par: BEN AOUIRA HAFSA  
BOUHALI NOUR ELHOUDA

**Intitulé**

**ETUDE DE L'INFLUANCE DES AJOUTS  
POUZZOLANIKES SUR L'EVOLUTION DU  
PROPRIETE D'UNE MATRICE CIMENTAIRE**

**Soutenu devant le jury composé de:**

.....

Siline Mohamed

.....

Université .....

Université M'sila

Université .....

Président

Rapporteur

Examineur

**Année universitaire : 2016 /2017**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# REMERCIEMENTS

*Nous tenons à remercier tout d'abord notre créateur {Allah} pour nous avoir donné de la force à accomplir ce travail.*

*Spécialement nos chers parents pour qui ont toujours la pour nous.*

*Notre encadreur : Sifine Mohamed pour son aide et conseil.  
Tous les membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous font En acceptant d'examiner ce mémoire et pour leur Bienveillante attention.*

*Nous adressons nos remerciements à tous nos professeurs honorés depuis plus de 5 ans ... et plus particulièrement M. Zine El Abidine Rahmouni, que Dieu les préserve et de les sauvegardent.*

*L'équipe du laboratoire de l'usine LafargeHolcim m'sila.  
Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à tous Nos proches et amis qui nous ont toujours soutenues et Encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.*

*Hafsa Nour elhouda*

## *Je dédie cette mémoire à...*

### *A ma très chère mère*

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

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

### *A mon très cher Père*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.*

### *A mes très chers frères Zakaria et Miño*

*Mes chers frères qui m'est le père et la mère, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous. Mon ange gardien et mon fidèle compagnon dans les moments les plus délicats de cette vie mystérieuse. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.*

### *A mes très chères sœurs Thoraya et Sirin*

*Présent dans tous mes moments d'exams par son soutien moral et ses belles surprises sucrées. Je te souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité. Je t'exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.*

### *A tous les membres de ma famille Ben aouira, Berrak, Mellili , petits et grands*

*Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection.*

*Surtout : AMAR CHOUITER*

### *A mes chères amies*

*Sara, Amel, Souhila, Houda, Khadidja, Noura, Imane*

### *A mes chers amis*

*En particulier Hussein qui m'a beaucoup aidé et m'a encouragé*

**HAFSA**

# *Dédicace*

*Je suis très heureuse de pouvoir dédier cet humble travail à ceux qui sont les plus chers à mon cœur :*

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.*

*A mon père «Abdelkader et Haifa».*

*A mes sœurs «Najat et Soumaia et son mari Ridha »*

*A mon cher frère Ahmed et Sliman.*

*Et le petit Diaa*

*A mon cher amie : « Fatna; Hafsa; Souhila; Amel; Imae ;*

*Kadija; Noura; Sara; Amira ».*

*A mes collègues*

*Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous  
Exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des*

*Frères, sœurs et des amis sur qui je peux compter.*

*Je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine*

*De santé et de bonheur.*

*Nour Elhouda*

# Sommaire

Résumé

Introduction générale .....	1
Objectifs de l'étude .....	1
Organisation du mémoire .....	2

## CHAPITRE I : LE CIMENT

INTRODUCTION .....	4
I.1. Définition du ciment .....	4
I-2. Principe de fabrication des ciments courants .....	5
I-2-1. Extraction .....	5
I-2-2. Concassage .....	6
I-2-3. Préparation du cru .....	6
I-2-3-1. Pré homogénéisation .....	6
I-2-3-2. Broyage-séchage .....	6
I-2-3-3. Séparation .....	7
I-2-3-4. Homogénéisation .....	7
I-2-4. Cuisson .....	7
I-2-5. Refroidissement .....	8
I-2-6. Broyage .....	8
I-2-7. Stockage, ensachage et expédition.....	8
I-3. Les principaux constituants du ciment .....	9
I-3-1. Composition chimique du clinker .....	9
I-3-2. Composition minéralogique du clinker .....	9
I-4. L'Hydratation du ciment .....	10
I-4-1. Mécanisme d'hydratation du ciment portland .....	10
I-4-1-1. Hydratation du silicate tricalcique $C_3S$ .....	11
I-4-1-2. Hydratation du silicate bi calcique $C_2S$ .....	12
I-4-1-3. Hydratation de l'aluminate tricalcique $C_3A$ .....	12

I-4-1-4. Hydratation de l'aluminoferrite tétra calcique C <sub>4</sub> AF .....	13
I-5. Les caractéristiques du ciment Portland .....	14
I-5-1. Prise .....	14
I-5-2. Durcissement .....	14
I-5-3. Chaleur d'hydratation [NF EN 197-9] .....	14
I-5-4. Finesse de mouture .....	14
I-5-5. Retrait [NF P 15- 433] .....	15
I-5-6. Gonflement [NF P 15- 433] .....	15
I-6. Impact environnementale (dégagement de CO <sub>2</sub> ) .....	15
I-6-1. Les émissions de CO <sub>2</sub> de l'industrie du ciment .....	15
I-6-2. Exemple d'évaluation des émissions de CO <sub>2</sub> provenant de la décarbonatation.....	17
I-7. Solutions pour réduire les émissions de CO <sub>2</sub> .....	17
I-8. L'industrie cimentaire en Algérie.....	18
I-8-1. Le groupe industriel des ciments d'Algérie (GICA) .....	18
I-8-2. Lafarge .....	19
I-8-3. L'utilisation des ajouts en Algérie .....	19
CONCLUSION .....	19

## **CHAPITRE II : LES POUZZOLANES**

INTRODUCTION.....	21
II-1. Historique.....	21
II-2. Matériaux à propriété pouzzolanique.....	22
II-2-1. Définitions.....	22
II-2-2. Types de pouzzolanes.....	22
II-2-2-1. Pouzzolane naturelle.....	23
II-2-2-2. Pouzzolane artificielle.....	23
II-2-3. Effet des pouzzolanes.....	25
II-2-3-1. A l'état frais.....	25
II-2-3-2. A l'état durci.....	25
II.2.4. Propriété de la pouzzolane.....	26

II-3. Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaire.....	26
II-4. Activité pouzzolaniques .....	27
II-4-1. Evaluation de l'activité pouzzolaniques.....	27
CONCLUSION .....	31

## **CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE**

INTRODUCTION.....	33
III-1. Caractéristiques des matériaux utilisés.....	33
III-1-1. Ciment Portland (CEM I) .....	33
III-1-2. Pouzzolane naturelle.....	33
III-1-3. Fumée de silice .....	34
III-1-4. Métakaolin.....	34
III.2. Formulation des ciments.....	35
III.2.1. Composition pondérale des différentes variantes de ciment.....	35
III.3. Essais sur ciments anhydres.....	35
III.3.1. Analyse chimique par fluorescence X (FRX) [NF P 15-467] .....	35
III.3.2. La Masse volumique absolue [NF P94-054] .....	36
III.3.3. Mesure la surface spécifique de Blaine SSB [EN 196-6] .....	36
III-4. Essai sur pâtes de ciment .....	37
III-4-1. Essai de consistance [NF EN 196-3] .....	37
III.4.2. Essais de prise [NF EN 196-3] .....	38
III.4.3. Essai de stabilité ou l'expansion des Chatelier [NF EN 196-3] .....	38
III.5. Essais sur mortiers .....	39
III.5.1. Mortier normalisé [NF EN 196-1] .....	39
III.5.2. Retrait et gonflement [NF P15 – 433] .....	40
III.5.3. La Chaleur d'hydratation (La méthode semi-adiabatique) [NF EN 196-9] .....	41
III.5.3.1. Calcul de la chaleur d'hydratation.....	41
III.5.4. Résistance à la compression [NF EN 196-1] .....	42
CONCLUSION .....	43

## CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATION

INTRODUCTION.....	45
IV-1. Les essais sur ciments anhydres.....	45
IV-1-1. Analyses chimiques des différents ciments préparés.....	45
IV.1.2. Influence des pourcentages des ajouts sur la masse volumique du ciment.....	46
IV.1.3. Influence des pourcentages des ajouts sur la surface spécifique (SSB) du ciment.....	47
IV.2. Les essais sur la pâte du ciment .....	48
IV.2.1. Influence des pourcentages des ajouts sur la consistance (E/C) .....	48
IV.2.2. Influence des pourcentages des ajouts sur la prise de la pate .....	49
IV.2.2. Influence des pourcentages des ajouts sur l'expansion de la pate .....	50
IV.3. Les essais sur mortier .....	51
IV.3.1. Influence des pourcentages des ajouts sur la résistance mécanique .....	51
IV.3.2. Influence des pourcentages des ajouts sur le Retrait de mortier .....	53
IV.3.3. Influence des pourcentages des ajouts sur le gonflement de mortier. ....	54
IV.3.4. Influence des pourcentages des ajouts sur la chaleur d'hydratation de mortier .....	55
CONCLUSION .....	56
CONCLUSION GENERALE .....	57

# Liste des tableaux

<b>Tableau I.1.</b> Composition chimique du clinker.....	9
<b>Tableau I.2.</b> Composition minéralogique d'un clinker de ciment Portland .....	10
<b>Tableau III-1.</b> Compositions chimique et minéralogique du CEM I.....	33
<b>Tableau III-2.</b> Caractéristiques physique du CEM I.....	33
<b>Tableau III-3.</b> Compositions chimique de la pouzzolane .....	34
<b>Tableau III-4.</b> Caractéristiques physique de la pouzzolane.....	34
<b>Tableau III-5.</b> Compositions chimique de la Fumée de silice.....	34
<b>Tableau III-6.</b> Caractéristiques physique de la Fumée de silice. ....	34
<b>Tableau III-7.</b> Compositions chimique du Métakaolin .....	34
<b>Tableau III-8.</b> Caractéristiques physiques du Métakaolin.....	34
<b>Tableau III-9.</b> Compositions pondérales des (10) ciments préparés.....	35
<b>Tableau III.10.</b> Malaxage du mortier selon la norme 196-1 .....	40
<b>Tableau IV-1.</b> Analyses chimiques par XRF des ciments préparés.....	45

# Liste des figures

<b>Figure I-1.</b> Schéma de la fabrication du ciment.....	5
<b>Figure I-2.</b> Schéma de fabrication du ciment portland.....	7
<b>Figure I-3.</b> Flux d'hydratation du ciment portland .....	11
<b>Figure I-4.</b> Un cristal hexagonal de Portlandite (au centre) entouré de gel CSH .....	12
<b>Figure I-5.</b> Aiguilles d'étrangéité .....	13
<b>Figure I-6.</b> Répartition des émissions de CO <sub>2</sub> selon leurs sources dans l'industrie cimentière.....	16
<b>Figure II-1.</b> Origine des matériaux pouzzolaniques .....	21
<b>Figure II-2.</b> Une pouzzolane naturelle .....	23
<b>Figure II-3.</b> Fumée de silice .....	25
<b>Figure II-4.</b> Montage de l'essai chapelle .....	28
<b>Figure II-5.</b> Digramme d'évaluation de la pouzzolanicité .....	29
<b>Figure II-6.</b> Utilisation de l'ATD pour l'évaluation de la réactivité d'une pouzzolane.....	30
<b>Figure IV-1.</b> Variation de la masse volumique de ciment en fonction des ajouts.....	46
<b>Figure IV-2.</b> Variation de la surface spécifique de ciment en fonction des ajouts.....	47
<b>Figure IV-3.</b> Evaluation de la consistance en fonction des ajouts.....	48
<b>Figure IV-4.</b> Temps de prise des différentes pâtes des ciments élaborés .....	50
<b>Figure IV-5.</b> Evolution de l'expansion du ciment en fonction des ajouts .....	51
<b>Figure IV-6.</b> Résistances mécaniques des pâtes des ciments élaborés, après 2 jours de durcissement.....	52
<b>Figure IV-7.</b> Résistances mécaniques des pâtes des ciments élaborés, après 7 jours de durcissement.....	52
<b>Figure IV-8.</b> Résistances mécaniques des pâtes des ciments élaborés, après 28 jours de durcissement.....	53
<b>Figure IV-9.</b> Evolution du Retrait du mortier en fonction des ajouts .....	54
<b>Figure IV-10.</b> Evolution du Gonflement du mortier en fonction des ajouts.....	55
<b>Figure IV-11.</b> Evolution de chaleur d'hydratation du mortier en fonction des ajouts.....	56

## **RESUME**

Les ajouts cimentaires actifs à caractère pouzzolanique font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés mécaniques des matériaux cimentaires (mortier). D'autre part leur utilisation a pour objectif de réduire la consommation de clinker (ciment), en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement.

Ce travail expérimental étudie les avantages de substitution partielle du ciment par différents ajouts pouzzolaniques. Il consiste à préparer des mélanges de ciment en remplaçant un certain pourcentage de ciment [5%, 10% et 20%] par des ajouts pouzzolaniques de différentes natures (pouzzolane naturelle, fumée de silice et métakaolin), et de suivre à chaque fois l'effet de cette substitution..

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que la quantité et la qualité des ajouts pouzzolaniques et la composition chimique du ciment confectionné sont les principaux paramètres qui influent sur la variation des résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers testés.

## ملخص :

الإضافات الإسمنتية الفعالة ذات الطابع البوزولاني هي حاليا جزء من أحدث التطورات في إنتاج الإسمنت، لأن استخداماتها توفر تحسنا في الخواص الميكانيكية للمواد الإسمنت (المونة). من ناحية أخرى يهدف استخدامها للحد من استهلاك الكلنكر (الإسمنت)، والمساهمة في حل بسيط واقتصادي للمشاكل البيئية.

الغرض من هذه الدراسة التجريبية هو دراسة مزايا وامكانية طريقة الاستبدال الجزئي لمادة الإسمنت بإضافات مختلفة من البوزولان ، وهو يتركز على إعداد خليط الإسمنت عن طريق استبدال نسب جزئية من الإسمنت (10,5% و 20%) بإضافات بوزولانية ذات طبيعة مختلفة ( بوزولان طبيعي ، غبار السيليكا و الميتاكاولان) وتتبع في كل مرة تأثير هذا الاستبدال.

وفقا للنتائج التجريبية، من الواضح أن كمية ونوعية الإضافات البوزولانية والتركيب الكيميائي للإسمنت وضعت هي العوامل الرئيسية التي تؤثر على تغير القوة الميكانيكية (الانحناء وضغط) من قذائف المونة المختبرة.

## **Abstract**

Active mineral additions currently with pozzolanic properties are currently among the most recent developments in cement production, as their use improves the mechanical properties of cement (mortar) materials. On the other hand, they reduce the consumption of clinker (cement), contributing in a simple and economic way to solve the problems related to the environment.

This experimental work studies the advantages of partial substitution of cement by various pozzolanic additions. It consists in preparing cement mixtures by replacing a certain percentage of cement [5%, 10% and 20%] with pozzolanic additions of different natures (natural pozzolan, silica fume and métakaolin). Effect of this substitution.

The experimental results show that the quantity and quality of pozzolanic additions and chemical composition of the cement are the main parameters that influence the variation of mechanical strengths (flexion and compression) of tested mortars.

# INTRODUCTION

### **INTRODUCTION GENERALE:**

Le ciment est un composant essentiel des matériaux cimentaires tels que le béton et le mortier. Il assure une fonction mécanique, car il lie le squelette granulaire, mais il est aussi en grande partie responsable de la tenue à long terme du matériau cimentaire.

Les ajouts minéraux sont largement utilisés en substitution partielle du clinker ou du ciment portland à travers le monde. Ils proviennent de sources naturelles (pouzzolane, calcaire, tuf, etc.) ou de sous produits industriels (fumée de silice, cendres volantes, laitier des hauts fourneaux, etc.). Leur valorisation présente plusieurs avantages : économiques, écologiques et environnementaux. Ils présentent un facteur très important dans la production des ciments Portland composés, du moment que la consommation en ciment baisse en fonction du taux d'ajout utilisé (pouzzolane naturelle, fumée de silice et métakaolin).

Les pouzzolanes (naturelles ou artificielles) ont l'avantage de modifier le résultat final d'hydratation d'une matrice en aboutant à une quantité de CSH plus importante contre une baisse dans la quantité de Portlandite, suite à leur réaction pouzzolanique. Les résultats de cette réaction améliorent nettement les performances physico-mécaniques de la matrice.

Comme l'industrie cimentaire est une source importante d'émission de gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ) à travers le monde, le recours aux ciments portland composés est une solution très intéressante. La réduction des émissions de  $\text{CO}_2$  passe désormais par la diminution de la part liée à la décarbonatation des matières premières lors de la phase de clinkérisation. Cette méthode semble être très bénéfique et ce qui permettra d'atteindre cet objectif (diminution de  $\text{CO}_2$ ) en utilisant surtout des ajouts de nature pouzzolaniques.

### **Objectif de l'étude :**

L'objectif principal de notre étude porte sur l'évaluation expérimentale des performances que peut apporter ces ajouts à un ciment CRS. Pour ce faire les matériaux: fumée de silice, Pouzzolane naturelle de Béni Saf et le Métakaolin ont été utilisés à différents pourcentages (5%, 10% et 20%) en remplacement de ciment. Les propriétés des ciments anhydres, des pâtes de ciment et des mortiers normalisés ont été évaluées.

Afin d'atteindre cet objectif, le travail de ce mémoire sera structuré de la manière suivante:

- **Introduction générale.**
- **Le premier chapitre :** Va aborder une recherche bibliographique sur le ciment portland, sa fabrication, son hydratation ainsi que son impact environnementale (dégagement de CO<sub>2</sub>).
- **Le deuxième chapitre :** Présentera une recherche bibliographique sur les ajouts minéraux actifs (pouzzolanes) et les méthodes d'évaluation de l'activité pouzzolanique.
- **Le troisième chapitre :** Nous présentons l'étude expérimentale menée. Les caractéristiques des matériaux utilisés (pouzzolane naturelle, fumée de silice et métakaolin) et les méthodes d'essais que nous avons réalisés sur les ciments et les mortiers préparés sont présentées en détail.
- **Le quatrième chapitre :** Il contiendra les différents résultats obtenus, pour lesquels nous avons essayé de donner des interprétations en relations avec nos connaissances acquises durant notre parcours de formation et la littérature des pouzzolanes.
- **Conclusion générale.**

**CHAPITRE01 :**

**LE CIMENT**

## INTRODUCTION:

Le ciment est un matériau de grande diffusion, connus de longue date. Les Romains ont mélangé de la chaux et des cendres volcaniques de Pouzzoles pour la construction du Panthéon. Le ciment industriel date du siècle dernier après que Vicat eut fixé la composition des matières premières à savoir 80% de carbonate de calcium, 20% de silice[MOR 97].

Le ciment n'a pris sa forme actuelle qu'au 19<sup>ème</sup> siècle :

- En 1759, l'Anglais John Smeaton produit un mortier aussi dur que de la pierre en mélangeant des chaux hydrauliques et des cendres volcaniques.
- En 1817, le Français Louis Vicat découvre les principes chimiques des ciments et définit les règles de fabrication du ciment hydraulique. Il est considéré comme l'inventeur du ciment moderne.
- En 1824, l'Ecossais Joseph Aspdin fait breveter le ciment « Portland », obtenu à partir d'un procédé de calcination combinant la cuisson de calcaire et d'argile dans des fours alimentés au charbon. La dénomination « Portland », s'explique dans sa similarité de couleur et de dureté avec la pierre de Portland située dans le sud de l'Angleterre.
- En 1872, Messieurs Dufosse et Henry établirent la première usine de production de ciment Portland à Cronfestu.
- Dès la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, le béton moderne à base de ciment Portland devient un matériau de construction largement répandu[GHE 15].

### I .1. Définition du ciment:

Le ciment est un liant hydraulique, il est défini selon la norme [NF EN197-1] comme un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

## I-2. Principe de fabrication des ciments courants:

Sans vouloir entrer dans le détail de la fabrication des ciments, il est cependant nécessaire d'en connaître les principes généraux et les différentes phases.

Les matières premières entrant dans la fabrication du clinker sont le calcaire et l'argile dans des proportions proches, respectivement, de 80% et 20%.

Le calcaire apporte le calcium, l'argile apporte la silice  $\text{SiO}_2$ , l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , et l'oxyde ferrique  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nécessaires au processus de formation du clinker.

Ces matières premières contiennent par ailleurs d'autres éléments que ces oxydes fondamentaux, tels de la magnésie  $\text{MgO}$ , des sulfates, des sulfures, des alcalis  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{Na}_2\text{O}_3$  dont les pourcentages doivent être contenus en deçà des limites précises [JEA 07].

La fabrication du ciment comporte les étapes suivantes (figure I-1) :

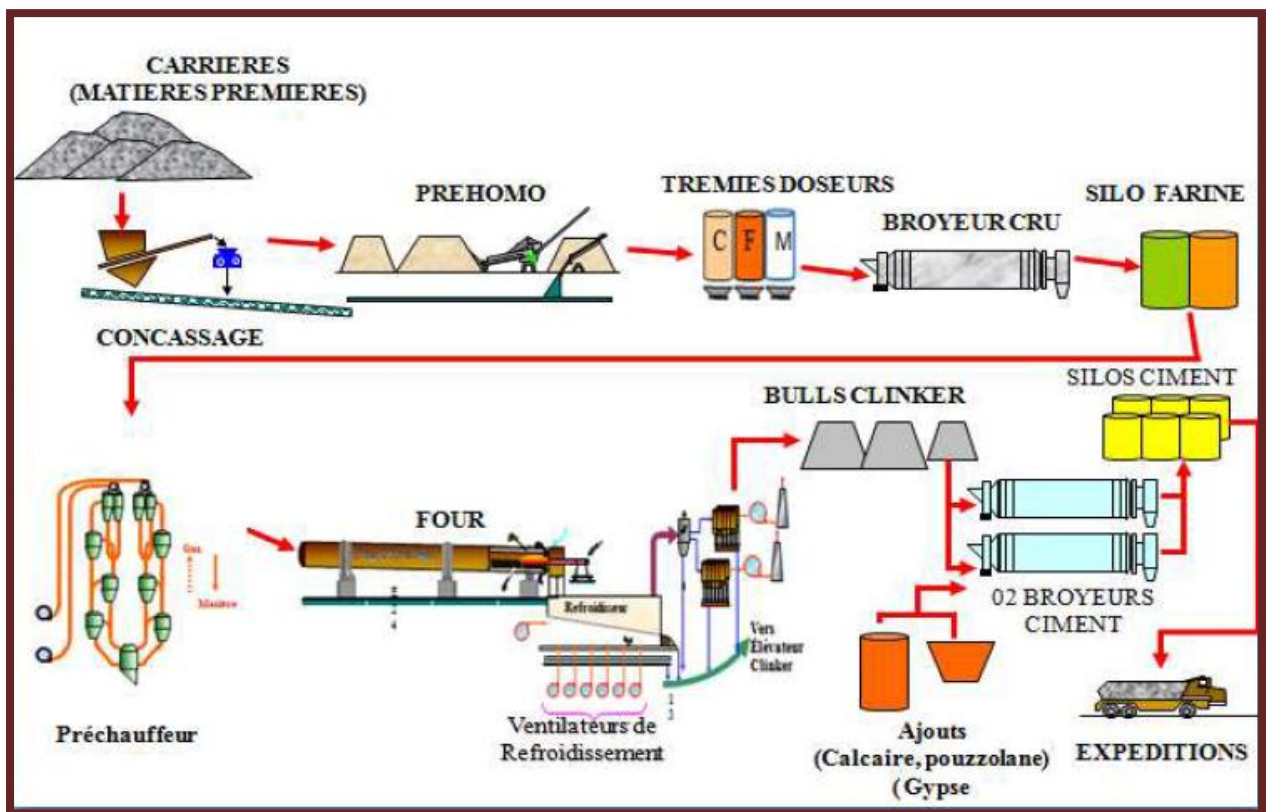


Figure I.1 : Schéma de la fabrication du ciment [CMC].

### I-2-1.Extraction :

L'extraction consiste en général pour le calcaire, à abattre la roche à l'explosif, dans des carrières généralement à ciel ouvert, de façon à la fragmenter en blocs chargés ensuite dans des dumpers pour alimenter les concasseurs, alors que l'argile, beaucoup plus meuble est exploitée au moyen d'excavateurs ou de roues pelles avant d'être transportée par camions.

**I-2-2. Concassage :**

Les matériaux extraits des carrières présentant des granulométries grossières allant jusqu'au 1 m. Le concassage, effectué le plus souvent sur les lieux mêmes de l'extraction, a pour but d'en limiter la granulométrie à 50, voire 100 mm au maximum. Les matériels utilisés à cette fin peuvent être mobiles, ou fixes.

**I-2-3. Préparation du cru :**

La préparation du cru au cours de laquelle on réalise le mélange homogène du calcaire et de l'argile dans des proportions définies en fonction de leurs compositions chimiques particulières, mais toujours proches du rapport 80% de calcaire pour 20% d'argile, peut se faire suivant différents procédés, le résultat final doit permettre l'obtention d'un clinker dont la teneur moyenne des différents oxydes constitutifs est de l'ordre de :

- 65 % de CaO (fourchette de 60 à 69 %).
- 21 % de SiO<sub>2</sub> (fourchette de 18 à 24 %).
- 6 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (fourchette de 4 à 8 %).
- 3 % de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (fourchette de 1 à 8 %).
- 2 % de MgO (fourchette de 0 à 5 % maximum).
- 1 % d'alcalis (fourchette de 0 à 2 % maximum).
- 1 % de SO<sub>3</sub> (fourchette de 0 à 3 % maximum).

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

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

La fabrication par voie sèche, comporte les phases suivantes :

**I-2-3-1. Préhomogénéisation :**

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

**I-2-3-2. Broyage-séchage :**

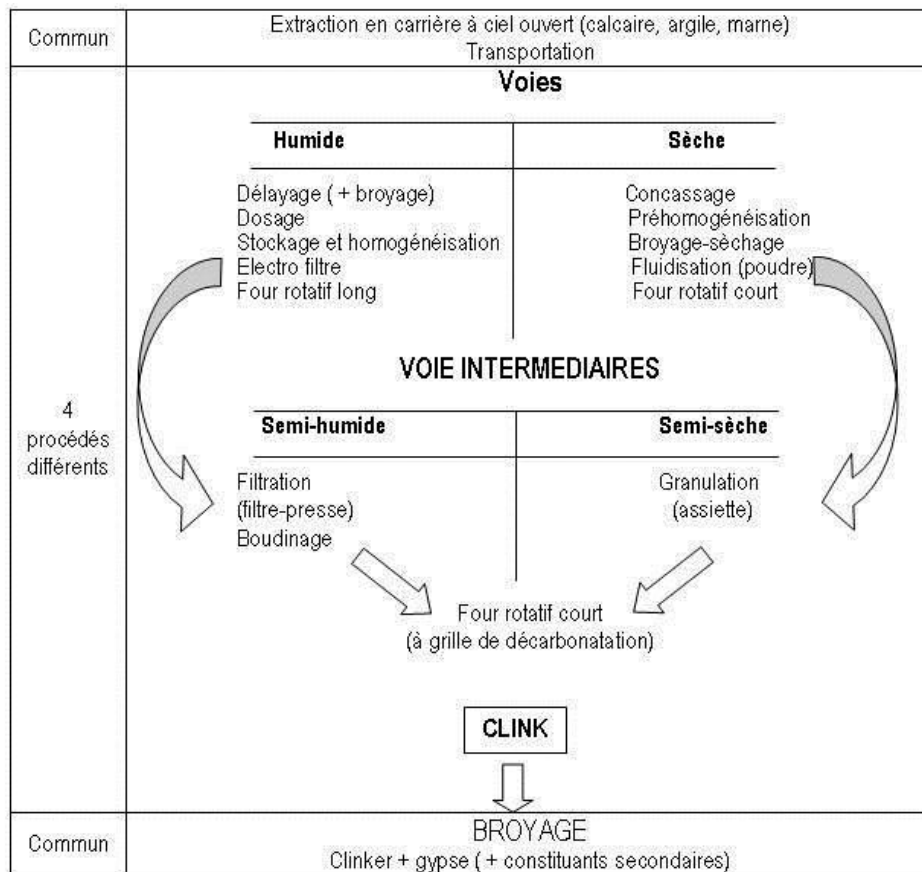
Repris à l'aide de roues pelles ou de gratteurs, le mélange précédent est envoyé à la station de broyage afin d'être réduit en une poudre de grains inférieurs à 160 microns.

**I-2-3-3. Séparation :**

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

**I-2-3-4. Homogénéisation :**

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



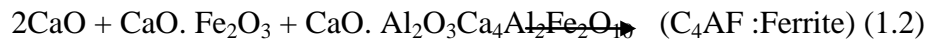
**Figure I-2 : Schéma de fabrication du ciment portland.**

**I-2-4. Cuisson :**

Réalisée dans des fours rotatifs dont les dimensions les plus courantes sont de l'ordre de 5 m de diamètre et de 80 à 100 m de longueur dans le procédé par voie sèche avec un inclinaison de 3% , (de 150 m dans le procédé par voie humide), à une température comprise entre 1400 et 1500 °C, la cuisson permet la transformation du cru en clinker, le cycle du traitement comportant les phases suivantes :

- Le préchauffage qui s'effectue dans un échangeur de chaleur situé à l'amont du four, les gaz chauds provenant du four y brassant la farine à contre-courant [JEA 07].

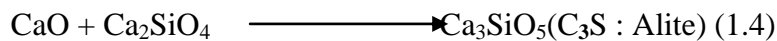
- A 100°C : évaporation de l'eau mécanique ou eau libre.
- Entre 450 et 550°C : évaporation de l'eau de constitution (chimique) de l'argile.
- A partir de 700 °C : Décomposition du calcaire:  $\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- A partir de 750°C : Formation des aluminates et aluminoferrites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



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



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



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

La cuisson est une opération forte consommatrice d'énergie. La source de chaleur est apportée par une tuyère qui peut brûler différents combustibles : (gaz naturel, fuel, charbon, coke de pétrole)[DJI 15].

### I-2-5. Refroidissement :

Cette opération a pour but d'abaisser la température du clinker qui est de l'ordre de 1200 à 1450 °C à la sortie du four à environ 50/250 °C suivant les types de refroidisseurs. Cette opération a également une incidence sur la qualité du ciment, un refroidissement trop lent pouvant amener la libération de chaux libre et la transformation du  $\text{C}_3\text{S}$  en  $\text{C}_2\text{S}$  qui entraîne une baisse des résistances.

### I-2-6. Broyage :

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

Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granules de clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse (dont le rôle est de réguler le phénomène de prise), ainsi qu'à celui des éventuels autres constituants (laitier, cendres...), ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés.

### I-2-7. Stockage, Ensachage et Expédition :

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac. L'ensachage, qui dans les pays industrialisés ne représente qu'environ 30% de la production de ciment, s'effectue dans des sacs en papier kraft à l'aide de machines capables de remplir de 2000 à 4000 sacs par heure. La livraison en vrac est assurée par camions, wagons ou péniches [JEA 07].

### I-3. Les principaux constituants du ciment:

#### I-3-1. Composition chimique du clinker :

Le composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO<sub>2</sub>), l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), et l'oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Ces matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, ils peuvent contenir d'autres oxydes, en particulier MgO et Na<sub>2</sub>O.

**Tableau I-1.** Composition chimique du clinker.

Elément	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	PAF
Fourchette(%)	62à68	18à24	4à8	2à5	0à5	0à5	0à2	0à2	0à2	≤ 5
Moyenne(%)	66,6	21,9	6,3	2,5	1	0,8	0,2	0,2	0,2	≤ 5

#### I-3-2. Composition minéralogique du clinker:

Le clinker est constitué de silicate tricalcique Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>, silicate bicalcique Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, d'aluminate tricalcique Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub> et d'aluminoferrite de calcium Ca<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>10</sub>. Les cimentiers ont adopté pour plus de simplicité une notation fondée sur la composition en oxydes dans laquelle C = CaO, S = SiO<sub>2</sub>, A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, F = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Ainsi les constituants du clinker d'après les formules de **BOGUE** sont :

- $C_3S = 4,07 \cdot CaO - 7,6 \cdot SiO_2 - 1,43 \cdot Fe_2O_3 - 6,72 \cdot Al_2O_3$  ;
- $C_2S = 2,87 \cdot SiO_2 - 0,75 \cdot C_3S$  ;
- $C_3A = 2,65 \cdot Al_2O_3 - 1,69 \cdot Fe_2O_3$  ;
- $C_4AF = 3,04 \cdot Fe_2O_3$ .

**Tableau I.2 :** Composition minéralogique moyenne typique d'un clinker de ciment Portland, d'après[TAY 97].

Constituants	Notation cimentaire	Formule Brute	% massique des différentes phases de clinker
Silicate tricalcique	C <sub>3</sub> S	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	60-65
Silicate bicalcique	C <sub>2</sub> S	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	10-20
Aluminate tricalcique	C <sub>3</sub> A	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	8-12
Aluminoferrite tétracalcique	C <sub>4</sub> AF	Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>10</sub>	8-10

#### I-4.L'Hydratation du ciment :

L'« Hydratation » est un mot utilisé pour décrire de la manière la plus générale, l'ensemble des réactions qui interviennent dès que l'on mélange le ciment avec de l'eau. Il se crée une réactivité en raison de ces liaisons devenues insaturées par le broyage et plusieurs mécanismes entremêlés ont lieu le plus souvent simultanément. Comme toutes les réactions chimiques, ces mécanismes élémentaires qui sont l'adsorption, l'hydrolyse, la dissolution, la solvataion et la cristallisation, conduisent à l'hydratation du ciment. Celles-ci obéissent à des lois thermodynamiques et cinétiques[REG 82].

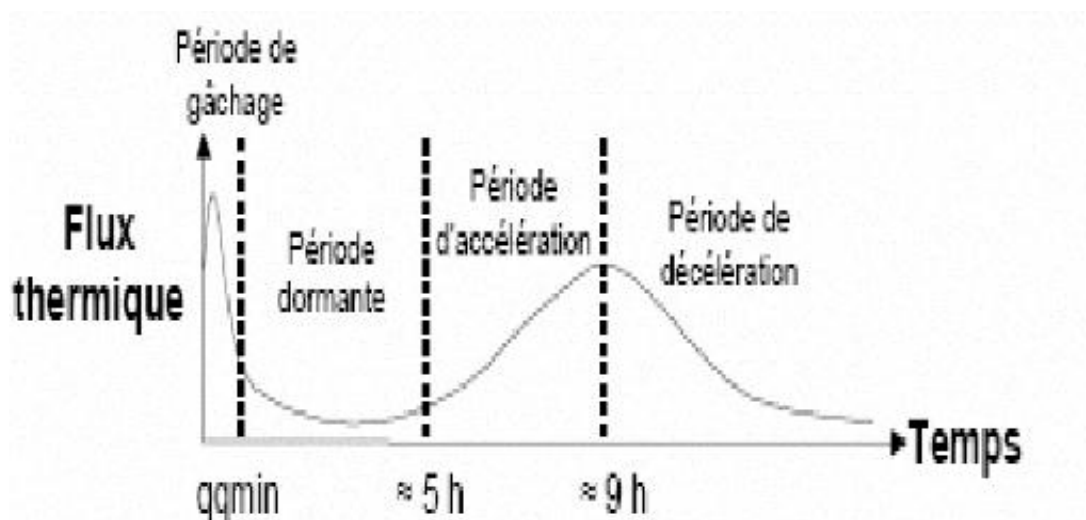
##### I-4-1. Mécanisme d'hydratation du ciment portland :

Lorsque le ciment entre en contact avec l'eau, une réaction exothermique instantanée se produit avec un fort dégagement de chaleur (figure I.3). Cette période de "pré induction" est de courte durée, elle est suivie d'une période de relative inactivité appelée "période dormante" au cours de laquelle le dégagement de chaleur est faible mais jamais nul. La durée de cette période varie entre 2 et 8 heures.

La période dormante est très importante quant à l'ouvrabilité (maniabilité) des bétons et mortiers car à la fin de cette période s'amorce la prise du ciment. La période dormante est connue par sa forte libération de chaleur.

Le 2<sup>ème</sup> pic suit la fin de la période dormante et correspond à la "période d'accélération" associée au début de prise et de durcissement du ciment. Certains ciments montrent un 3<sup>ème</sup> pic après 20 heures d'hydratation. La plupart des chercheurs sont d'accord sur la période de pré-

induction, mais les échanges réactionnels qui s'effectuent pendant la période dormante, de même que la cause de la fin de cette période sont toujours sujette à controverses.



**Figure I-3.** Flux d'hydratation du ciment portland[WAN 10].

La durée de la période dormante est influencée par une variété de facteurs dont la température, les imperfections cristallines des minéraux, la taille des grains est rapport E/C.

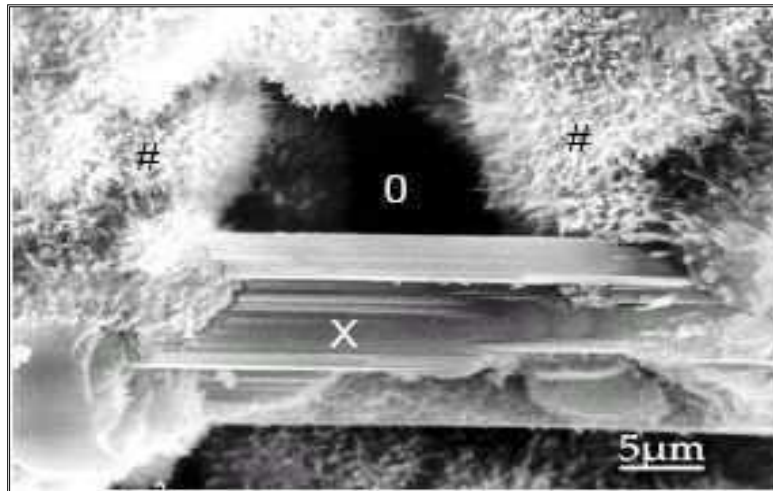
#### I-4-1-1. Hydratation du silicate tricalcique $C_3S$ :

L'hydratation des silicates produit des gels de silicate de calcium hydraté et l'hydroxyde de calcium. La réaction du  $C_3S$  avec de l'eau est la suivante:



Les hydrates ainsi obtenus au cours de l'hydratation du  $C_3S$  sont:

- Les silicates de calcium hydratés (CSH) qui présentent entre 60 et 70% de la masse de ciment, complètement hydratée, contenu dans l'apâte. Ils ont une structure en feuillets formées de cristaux très petits et mal cristallisés. La surface spécifique est très élevée (100 - 700 m<sup>2</sup>/g). La cohésion des feuillets de CSH est due aux forces de Van Der Walls entre leurs parties colloïdales
- L'autre composant principal dans l'hydratation des silicates tricalciques est l'hydroxyde de calcium CH (ou Portlandite) qui présente entre 20 à 25% de la masse initiale du ciment complètement hydratée, dans l'apâte. La Portlandite à une morphologie hexagonale prismatique, elle participe très peu au développement de la résistance. En fait, la présence de la Portlandite peut être un risque, parce qu'elle est fortement soluble et susceptible à l'attaque d'acide et de sulfate[KIR 98].



**Figure I-4.**Un cristal hexagonal de Portlandite (au centre) entouré de gel CSH [REG 75].

#### I-4-1-2.Hydratation du silicate bi calcique C<sub>2</sub>S :

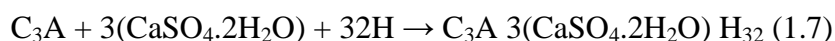
Une fois hydraté, C<sub>2</sub>S donne aussi des CSH. La réaction est donnée par:



Les études calorimétriques ont montré des résultats semblables à ceux de l'hydratation de C<sub>3</sub>S mais avec moins d'évolution de la chaleur. Selon des calculs de stœchiométrie, l'hydratation de C<sub>3</sub>S produirait 61% de gel de CSH et 39% de CH alors que l'hydratation de C<sub>2</sub>S produirait 82% de gel de CSH et seulement 18% de CH, donc une quantité plus élevée de C<sub>2</sub>S dans le ciment aurait comme conséquence plus de résistance. Pour la résistance au jeune âge, cependant, plus de C<sub>3</sub>S est nécessaire, parce que sa vitesse de réaction est plus élevée.

#### I-4-1-3.Hydratation de l'aluminate tricalcique C<sub>3</sub>A :

L'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O). En l'absence du gypse, la réaction de C<sub>3</sub>A avec de l'eau est très violente et mène au raidissement immédiat de la pâte, connu sous le nom de prise rapide. En présence du gypse, les C<sub>3</sub>A réagissent d'abord pour former le trisulfoaluminate hydraté (Ettringite) qui se cristallise en aiguilles à base Hexagonale. La réaction est donnée par:



Le gypse ajouté au clinker (3 à 5% en poids) n'est pas en teneur suffisante pour transformer tous les aluminates en étrétingite. Il apparaît donc secondairement un monosulfoaluminate qui se cristallise en plaquettes hexagonales.

La réaction est donnée par:

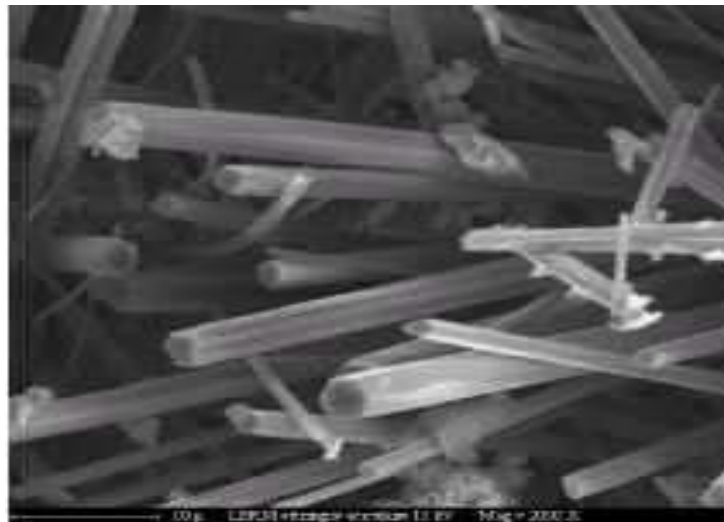
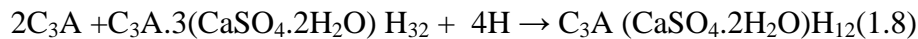
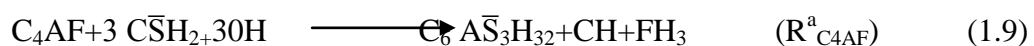


Figure I-5. Aiguilles d'étrétingité [GUI 04]

**I-4-1-4. Hydratation de L'aluminoferrite tétra calcique C<sub>4</sub>AF :**

Le C<sub>4</sub>AF réagit avec le gypse selon un mode semblable de celui du C<sub>3</sub>A, mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente. Dans la première étape de la réaction, le C<sub>4</sub>AF produit une forme élevée de sulfoaluminate de calcium qui réagit avec l'excès de C<sub>4</sub>AF pour donner une basse forme de sulfoaluminate. Ces sulfoaluminates occupent environ 15-20% du volume de solides dans la pâte. La réaction du C<sub>4</sub>AF dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance.

L'hydratation des aluminates est de grande importance pratique parce qu'ils affectent les propriétés de prise du ciment. Les réactions des C<sub>4</sub>AF sont données par:



## **I-5. Les caractéristiques du ciment portland :**

### **I -5-1. Prise :**

La prise du ciment c'est-à-dire le passage de la pâte de ciment (ciment + eau) d'une consistance fluide à un état solide est une phase essentielle dans la fabrication du béton ou mortier puisqu'elle donne de la cohésion au matériau.

La norme **NF 197-1** spécifie, suivant les ciments, un temps de prise minimal de :

- 1h30 pour les ciments des classes 32,5 et 32,5R.
- 1h pour les ciments des classes 42,5-42,5R-52,5 et 52,5R.

D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2h 30 à 3h30 pour la grande majorité des ciments, ces valeurs s'entendent pour une température ambiante de 20°C [DRE 98].

### **I-5-2. Durcissement :**

Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement rapide qui se poursuit pendant des mois voire des années au cours desquelles les résistances mécaniques continuent de croître.

Lorsqu'on désire un durcissement rapide, on choisit des ciments de classe élevée et de préférence de classe « R » c'est-à-dire ayant la caractéristique complémentaire. « Rapide ». Il est également possible d'utiliser du ciment alumineux fondu CA, qui après quelques jours a atteint la quasi-totalité de sa résistance [DRE 98].

### **I-5-3. Chaleur d'hydratation [NF EN 197-9]:**

La dissolution des différents constituants est exothermique et, selon leurs pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est donc plus ou moins important, c'est le cas par exemple des ciments riches en  $C_3A$  que l'on s'intéresse à les temps chaud. Suivant les ciments, cette chaleur est comprise à 12 heures, approximativement, entre 65 j/g par exemple pour certains CEM III/B et 300 j/g pour certains CEM I. La norme algérienne [NA 442] exige pour un ciment normalisé, une valeur maximale de 270 j/g après 41 h d'hydratation.

**I-5-4.Finesse de mouture :**

La finesse de mouture, également appelée finesse Blaine, exprimée en  $\text{cm}^2/\text{g}$ , représente la surface spécifique ou surface développée (en  $\text{cm}^2$ ) d'une masse de 1g de ciment. Elle est, d'une façon générale, comprise entre 3000 et 3500  $\text{cm}^2/\text{g}$ , certains ciments prompts naturels « CNP » ont un Blaine supérieure à 4500  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

Plus la finesse est grande, plus les résistances sont précoces et élevées, mais par contre, plus les risques de retrait et par conséquent de fissuration ainsi que d'éventement du Ciment sont accrus.

**I-5-5.Retrait [NF P 15- 433] :**

Lorsque l'élément du béton ou mortier se trouvera dans une atmosphère ayant une humidité relative inférieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier diminuent, c'est le retrait.

On mesure le retrait sur des éprouvettes prismatiques de mortier normalisé de 16 cm de longueur et d'une section droite de 4×4cm, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de (50±5)%. Pour un ciment ordinaire CEM I 42.5, la norme **NF P15-301** impose un retrait maximal de 1000  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

**I-5-6. Gonflement [NF P 15- 433] :**

Si l'élément se trouve dans une atmosphère à humidité relative supérieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier augmentent, c'est le gonflement. Ce qui entraîne l'apparition des tensions internes [DRE 98].

On mesure le gonflement sur des éprouvettes prismatiques de mortier normalisé de 16 cm de longueur et d'une section droite de 4×4cm, conservées dans l'eau à une température de 20°C. Les normes nationales et européennes n'exigent pas une valeur minimale pour le gonflement.

**I-6.Impact environnementale (dégagement de CO<sub>2</sub>):**

Le ciment portland est produit en très grandes quantités dans le monde et à des coûts très faibles mais il émet en contrepartie de grandes quantités de CO<sub>2</sub>.

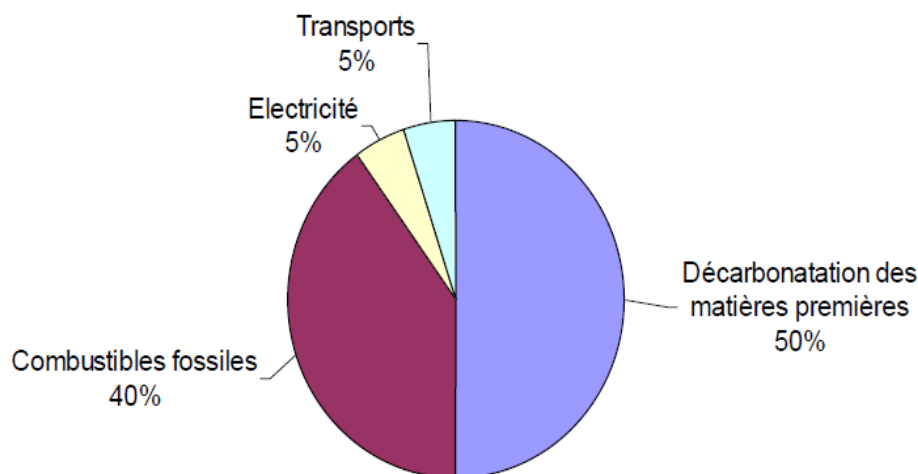
Dans l'optique de la réduction des émissions de procédé de CO<sub>2</sub> liées à la production de ciment, il est possible d'ajouter des additifs au clinker par l'intermédiaire des ciments mélangés. Pour cela, il faut le remplacer par des matériaux n'induisant pas ou peu d'émissions de CO<sub>2</sub> mais permettant de fabriquer des liants structurels solides [ATE 06].

**I-6-1. Les émissions de CO<sub>2</sub> de l'industrie du ciment :**

Le ciment est obtenu par calcination à très haute température (environ 1450°C) du cru composé de roches calcaires et argileuses. Ce processus génère une forte consommation d'énergie (divers combustibles fossiles sont utilisés : charbon, gaz naturel, fioul etc.) et des émissions de CO<sub>2</sub> très importantes.

D'après une étude menée par le (WBCSD), l'industrie cimentière est responsable de 5% des émissions de gaz à effet de serre liées à l'activité humaine. Pour l'industrie du ciment ces émissions sont principalement de deux sortes : émissions énergétiques et émissions de procédé. Les émissions énergétiques sont liées à la production de l'énergie thermique nécessaire à la fabrication du clinker. Les émissions de procédé 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 (décarbonatation du carbonate de calcium). A ces deux sources principales il faut ajouter les émissions dues au transport des matières premières et à la consommation d'électricité. D'après une étude publiée en juin 2009 par la WBCSD, la quantité moyenne mondiale de CO<sub>2</sub> émise par tonne de clinker produit était, en 2006, de 866 kg CO<sub>2</sub>/t [DAM 05].

D'après un rapport antérieur de la WBCSD en 2002 [TOW02], la répartition du CO<sub>2</sub> émis lors de la production de clinker se fait comme indiqué sur la Figure I-6 [CAM 10].



**Figure I-6.** Répartition des émissions de CO<sub>2</sub> selon leurs sources dans L'industrie cimentière [CAM10].

Le CO<sub>2</sub> émis peut être séparé en deux parts principales en fonction de sa source :

- ✓ Le CO<sub>2</sub> issu de la combustion des énergies fossiles utilisées dans le four.
- ✓ Le CO<sub>2</sub> issu de la décarbonatation de la matière première.

En réalité, il faut y ajouter le  $\text{CO}_2$  émis par les moyens de transport et la production de l'électricité nécessaires pour le fonctionnement de la cimenterie [CAM10].

### I-6-2.Exemple d'évaluation des émissions de $\text{CO}_2$ provenant de la décarbonatation:

Weiguo et al [WEI 02] ont proposé une formule permettant d'évaluer la quantité de  $\text{CO}_2$  émise suite à la décarbonatation d'une tonne de clinker. En supposant et du fait des impuretés, que la matière première de  $\text{CaCO}_3$  renferme 95% de calcium et que les carbonates de magnésium  $\text{MgCO}_3$  ne contient que 75% de magnésium. D'autre part, les auteurs pensent que le clinker d'un ciment ordinaire contient 65% de  $\text{CaO}$  et 1,8% de  $\text{MgO}$ , d'où, ils estiment que la quantité de  $\text{CO}_2$  due à la décarbonatation des matières premières  $\text{MP}_{(\text{CO}_2)}$  vaut:

$$\text{MP}_{\text{CO}_2} = M_{\text{CaO}} \times \frac{44}{56} \times R_{\text{CaCO}_3} + M_{\text{MgO}} \times \frac{44}{40} \times R_{\text{MgCO}_3} \quad (1.12)$$

Où 44, 40 et 56 sont respectivement les masses molaires de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{MgO}$  et  $\text{CaO}$ .

A partir de cette relation, les auteurs ont trouvé que le  $\text{MP}_{(\text{CO}_2)}$  obtenu à partir de l'équation (1.12) est de l'ordre de 0,500 t de  $\text{CO}_2$  pour chaque tonne de clinker.

Il est à noter que cette évaluation ne présente pas la quantité totale du  $\text{CO}_2$  émise par la production d'une tonne de ciment, il faut ajouter les autres causes: combustion des énergies fossiles, électricité, transport, etc.

A partir de cette évaluation on peut conclure que le remplacement d'une partie du clinker par un autre matériau non émetteur de  $\text{CO}_2$  est très bénéfique en matière d'impact environnemental de l'industrie cimentaire. La substitution de 10% de clinker par un ajout correspond systématiquement à une baisse de 10% dans le taux du gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ) dû à la décarbonatation des matières premières nécessaires pour la fabrication du clinker. Les ajouts pouzzolaniques ont, en plus de cet avantage environnemental, la particularité d'améliorer plusieurs performances des ciments résultants.

### I-7. Solutions pour réduire les émissions de $\text{CO}_2$ :

Ont été mises en œuvre par l'industrie cimentière depuis de nombreuses années :

- Avant cuisson, incorporation dans les matières premières certains matériaux sélectionnés (cendres volantes), qui sont soit déjà décarbonatés soit ne contenant pas de calcaire.

- Après cuisson, incorporation dans les ciments des constituants (laitiers de haut-fourneaux ou cendres volantes) réduisant d'autant la quantité de clinker qui est la matière issue de la cuisson et constituant de base du ciment.
- Utilisation des combustibles de substitution comme certains déchets. S'ils n'étaient pas brûlés en cimenterie, ces déchets seraient éliminés par la voie de l'incinération traditionnelle. Dans ce cas, les rendements énergétiques sont beaucoup plus faibles et quelquefois nuls. Les émissions de CO<sub>2</sub> correspondantes viennent alors s'ajouter à celles dues à la fabrication des ciments, et des déchets ultimes sont placés en décharge sans aucune valorisation en produisant parfois même du méthane, autre gaz à effet de serre.
- En définitive, toute utilisation de déchet comme combustible pour la fabrication des ciments est une « valorisation », souvent préférable d'un point de vue écologique à l'élimination car elle permet des économies d'énergie et la diminution des émissions de CO<sub>2</sub>[JAC05].

### **I-8. L'industrie cimentaire en Algérie:**

L'industrie cimentaire en Algérie est régie par le Groupe Industriel des Ciments d'Algérie GICA présent sur le marché avec ses 12 usines à travers le territoire algérien. Le marché est alimenté également par la deuxième compagnie cimentaire, Groupe Lafarge.

Globalement, la production nationale actuelle de ciment avoisine 18 millions de tonnes/an, pour un besoin annuel de 21 millions de tonnes. Pas moins de 3 millions de tonnes de ciments sont donc importés chaque année. Cependant, avec l'entrée en production de plusieurs unités, publiques et privées, et le renforcement de la production de celles déjà existantes, l'année 2017 sera celle de l'autosatisfaction du marché national en ciment. Mieux encore, le ministre de l'Industrie et des Mines, Abdesselam Bouchouareb, a affirmé, récemment, que les projets de réalisation de cimenteries qui seront réceptionnés à l'horizon 2019-2021 permettront de dégager plus de 10 millions de tonnes de ciment à l'export, précisant que les cimenteries de Béni Saf et de Hadjar Soud, toutes deux réalisées à proximité de ports, seront orientées vers l'exportation.

#### **I-8-1. Le Groupe industriel des ciments d'Algérie (GICA) :**

«Notre objectif est d'atteindre une production annuelle de 23 millions de tonnes de ciment en 2019» signale le site spécialisé des ciments dans son édition du 4 janvier 2016. En effet, le Groupe industriel des ciments d'Algérie (GICA) prévoit d'augmenter sa capacité de ciment dans quatre usines et d'en construire deux autres ce qui entraînera une augmentation de sa capacité actuelle de production.

Les projets d'extension des sites d'Ain Kebira et Chlef devraient être achevés en septembre de cette année, ce qui augmentera la capacité annuelle à 15,5 MT. En outre, Zahana et Béni Saf verront l'ajout de nouvelles chaînes de production, créant ainsi une augmentation des capacités annuelles de 3,5 Mt. De ce fait, le GICA prévoit de remplacer les 3,5 Mt d'importations par la production nationale d'ici la fin de l'année 2017.

Les nouvelles centrales d'Oum El Bouaghi et Bechar devraient être livrées en Novembre 2018 permettant un renforcement du potentiel de production à 3 Mt annuellement.

### **I-8-2.Lafarge :**

Est un groupe Partenariat Suisse Français de matériaux de construction, leader mondial dans son secteur. Il produit et vend principalement du ciment, des granulats et du béton prêt à l'emploi dans le monde entier. Lafarge a développé des ciments spéciaux et des bétons innovants de renommée internationale.

Le groupe Lafarge possède déjà 2 cimenteries (M'Sila&Oggaz) et une troisième entrée en production l'année dernière à Biskra, en partenariat avec le groupe industriel privé Souakri, avec une capacité totale de production qui dépasse les 11,5 millions de tonnes par an. Il gère également, mais en partenariat avec le groupe GICA, la cimenterie de Meftah.

### **I-8-3. L'utilisation des ajouts en Algérie :**

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie. On peut citer, l'utilisation des ajouts actifs tels que le laitier d'EL-Hadjar par la cimenterie de Hamma Bouziane et la pouzzolane naturelle de Beni-Saf par les cimenteries de Zahana et Béni-Saf. D'autres cimenteries utilisent des ajouts inertes tel que le calcaire comme ECDE de Chlef. La nouvelle cimenterie de M'sila utilise déjà un ciment ternaire avec la combinaison de la pouzzolane avec le calcaire[SAB 10].

### **CONCLUSION :**

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450 °C.

Les perspectives de réduction des impacts environnementaux de l'industrie cimentaire semblent donc résider dans l'utilisation de quantités importantes des ajouts, notamment pouzzolaniques, en substitution du clinker, dans l'industrie cimentaire.

En Algérie, le recours à ce type d'ajout, à part la pouzzolane naturelle de Béni Saf, reste très limité, soit du fait de son coût (cas de fumée de silice) soit du fait de la nécessité d'un traitement (cas des argiles calcinées).

**CHAPITRE02 :**  
**LES POUZZOLANES**

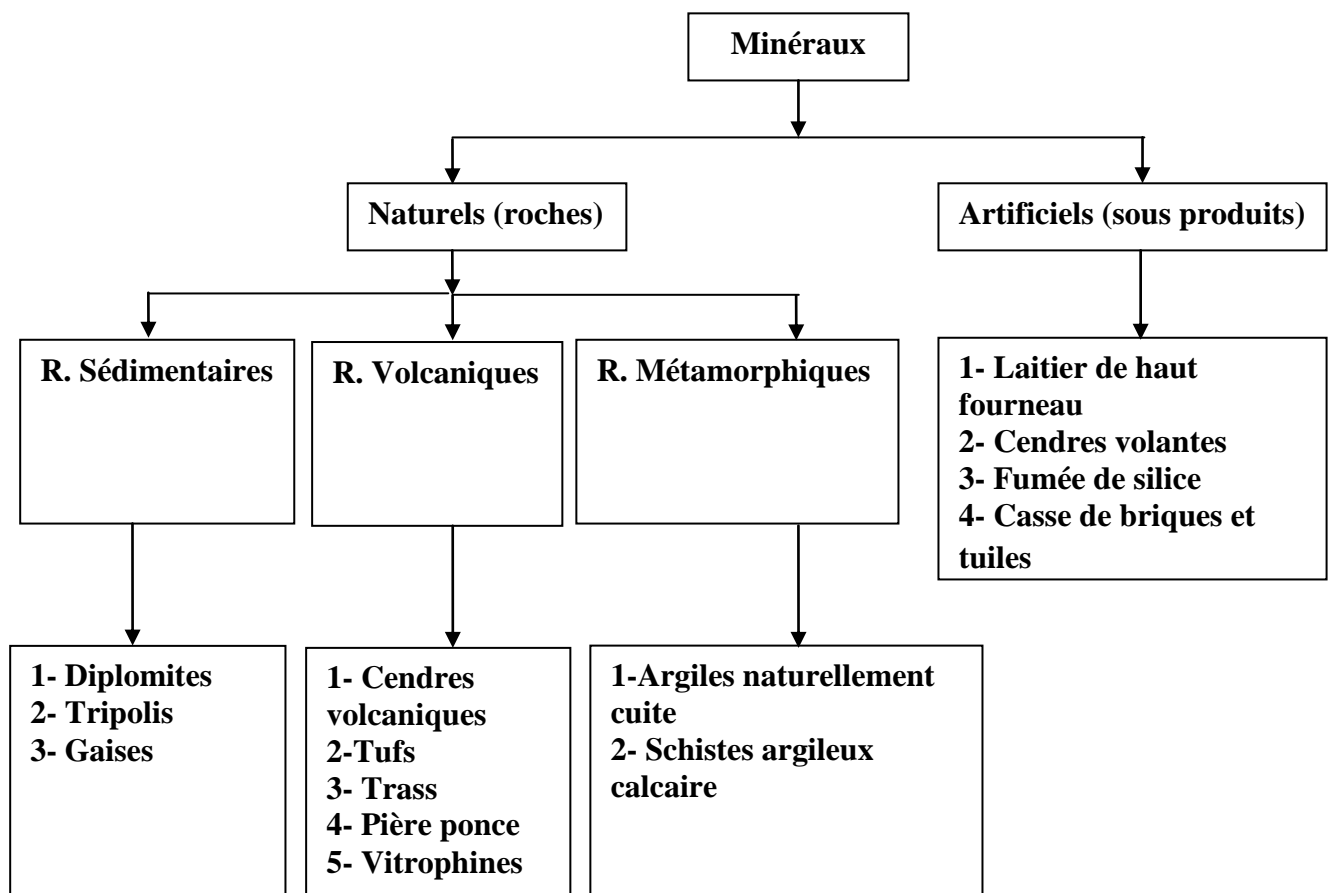
**INTRODUCTION :**

Les ajouts cimentaires sont des matériaux minéraux que l'on mélange au ciment Portland afin d'améliorer les propriétés du mortier ou du béton grâce à une activité hydraulique et ou pouzzolanique.

Les matériaux pouzzolaniques (les cendres volantes, la fumée de silice, les pouzzolanes naturelles et les argiles calcinées) sont employés d'une manière globale comme additifs avec les liants aériens et hydrauliques.

**II-1. Historique :**

Les Grecs et les romains avaient remarqué que les matériaux de dépôts volcaniques, lorsqu'ils sont moulus et mélangés avec de la chaux, donnent un mortier avec une bonne tenue à l'action de l'eau et une résistance mécanique très élevée.



**Figure II-1.** Origine des matériaux pouzzolaniques [BES 10].

Les Grecs employaient le tuf volcanique de l'île de Santorin, par contre les romains se servaient d'un tuf volcanique rouge de la région de Naples. Les romains ont beaucoup plus préféré un type de roche qui se trouve aux environs de la ville de Pozzuoli, d'où le nom de pouzzolane sous lequel était alors connu tout matériau ayant des propriétés comparables.

Aujourd'hui cette dénomination s'étendue et s'applique à un grand nombre de matériaux d'origine diverses, selon la classification donnée par l'organigramme de la figure II-1 [MEA 78]. La poudre de tuile ou de brique mélangé avec de la chaux en présence d'eau produit le même effet, les poudres de la terre cuite fabriquées spécialement pour cet usage, sont appelées aujourd'hui pouzzolanes artificielles.

## **II-2. Matériaux à propriété pouzzolaniques :**

### **II-2-1. Définitions :**

Par pouzzolane naturelle on désigne au sens strict les pyrolusites, qui sont des projections des éruptions volcaniques [MEU 04].

Les pouzzolanes sont composées essentiellement de silice ( $\text{SiO}_2$ ) et d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). La partie restante contient de l'oxyde de fer et d'autres oxydes ainsi qu'un pourcentage de chaux ( $\text{CaO}$ ). La proportion de  $\text{CaO}$  réactif est négligeable vis-à-vis du durcissement. La teneur en  $\text{SiO}_2$  réactif doit être au moins égale à 25% en masse [NA 442].

Elles sont généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise.

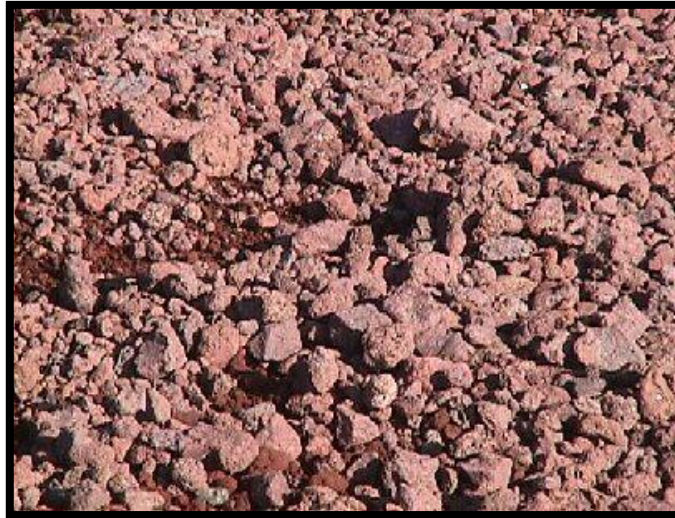
Les matériaux pouzzolaniques ne durcissent pas par eux-mêmes lorsqu'ils sont mélangés avec de l'eau mais, lorsqu'ils sont finement broyés, ils réagissent à température ambiante, en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] dissous, pour former des composés de silicates de calcium et d'aluminates de calcium générateurs de résistances. Ces composés sont comparables à ceux qui sont formés lors du durcissement des matériaux hydrauliques. Les matériaux pouzzolaniques doivent être convenablement préparés, c'est-à-dire sélectionnés, homogénéisés, séchés ou traités thermiquement et réduits en poudre, en fonction de leur état à la production ou à la livraison [NA 442].

### **II-2-2. Types de pouzzolanes:**

Les matériaux pouzzolaniques sont divisés en deux grandes catégories : les pouzzolanes naturelles et les pouzzolanes artificielles :

**II-2-2-1. Pouzzolane naturelle :**

C'est un produit composé essentiellement de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. La pouzzolane naturelle peut être d'origine volcanique: verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites [KIT 72].



**Figure II-2.** Une pouzzolane naturelle [DOM 99]

**a. Verre volcanique :**

Il y a lieu de citer les pouzzolanes des roches pyroclastiques meubles ou à faible cohésion provenant des éruptions volcaniques. Ce type de roche se trouve dans un état vitreux ou du moins sous une forme d'instabilité ou de réactivité qui les rend sensibles à l'attaque par l'hydroxyde de calcium. On mentionne à titre d'exemples : pouzzolane de SANTORIN, de BALCOL en Italie et de SHIRASHU au Japon.

**b. Tufs volcaniques compacts :**

Elles sont différentes des pouzzolanes de type verre volcanique. Ce sont les mêmes roches, mais ayant subi des transformations chimiques. L'altération du verre volcanique dans des conditions hydro-thermiques se traduit par la formation des minéraux zéolitiques de composition chimique variable. Ce genre de pouzzolane se distingue par une texture dure et compacte.

**II-2-2-2. Pouzzolane artificielle :**

C'est une matière composée, essentiellement, de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement souvent thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Parmi les matériaux traités thermiquement on cite: les argiles, schistes, latérite, bauxite [MEU 04].

**a. Cendres volantes :**

Les cendres volantes sont le résidu finement divisé résultant de la combustion de la houille pulvérisée, dans les centrales thermiques. La première utilisation des cendres volantes comme matériau pouzzolanique a débuté aux USA en 1937.

On définit trois types de cendres volantes, en fonction de leur teneur en oxyde de calcium (CaO). Les cendres volantes qui présentent des teneurs en CaO inférieures à 8%, celles allant de 8% à 20% et celles supérieures à 20%. Le constituant majeur est une phase vitreuse formée de silice et d'alumine de 50 à 90% [NAB 05].

**b. Les argiles calcinées :**

L'argile calcinée est utilisée dans les constructions en béton conventionnel, tout comme dans le cas des autres pouzzolanes. Elle peut être utilisée en remplacement partiel du clinker ou de ciment [STE 04].

Parmi les argiles utilisées pour l'obtention des pouzzolanes artificielles on cite: la muscovite, l'illite, le schiste et la kaolinite. Le métakaolin est une poudre de grande surface spécifique obtenue par calcination-broyage ou broyage-calcination d'une argile composée majoritairement de kaolinite. Le métakaolin est constitué principalement de particule de silicate d'alumine amorphe ayant des propriétés pouzzolaniques, il composé essentiellement de silice  $\text{SiO}_2$  et alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  réactifs.

Les températures de calcination pour le métakaolin sont comprises entre 600 °C et 850 °C suivant le degré d'ordre de la kaolinite. Il se produit une réaction de déshydroxylation du matériau avec une destruction de la structure cristalline initiale conduisent à une nature amorphe du matériau. Le métakaolin se présente se forme pulvérulente ou se forme de suspension [NF P18-513].

**c. Fumée de silice :**

Les fumées de silice sont des particules de très petite taille (environ 0,1 $\mu\text{m}$ ) issues de l'industrie de l'acier. Ces particules sont principalement composées de silice amorphe (>85%) et présentent des propriétés pouzzolaniques. Elles permettent aussi de compléter la granulométrie des ciments et ainsi d'améliorer la compacité du matériau durci et donc sa résistance mécanique [DRE 98].



**Figure II-3.** Fumée de silice.

### **II-2-3. Effet des pouzzolanes:**

Les pouzzolanes confèrent aux bétons les propriétés suivantes :

#### **II-2-3-1. A l'état frais:**

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplée à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration.

#### **II-2-3-2. A l'état durci:**

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice de ciment se traduit par une série d'effets très favorables :

- Accroissement de la résistance finale.
- Légère diminution du retrait et du 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'agressions chimiques.
- 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 du béton.
  - ❖ Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces [NAB 11].

### II.2.4. Propriété de la pouzzolane:

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble selon NF P18-513), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux. Leur influence dans une matrice cimentaire peut être constatée à travers deux volets:

- **Propriétés Chimiques :**

La partie réactive de la pouzzolane ( $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme.

Les réactions d'hydratation du ciment et des pouzzolanes donnent :



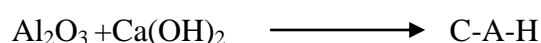
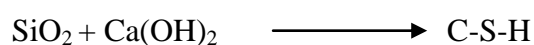
- **Propriétés physiques de remplissage :**

En plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité [PIC 96].

### II-3. Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaire :

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux suite à la réaction de l'hydratation du  $\text{C}_3\text{S}$  et  $\text{C}_2\text{S}$  (30% de la masse du ciment). Cette chaux contribue très peu dans la résistance de la pâte cimentaire hydratée. Elle peut même être responsable de problème de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau, ce lessivage augmente alors la porosité dans le béton ce qui augmente sa perméabilité.

Les ajouts cimentaires (actifs) réagissent avec cette chaux libérée par l'hydratation du ciment pour donner des C-S-H, véritable liant contribuant à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau. L'idéal est d'avoir une ultrafine à grande cinétique de réaction, avec des grains lisses (à défloculation facile) et à très forte activité pouzzolanique [CHA 10] Les réactions pouzzolaniques sont les suivantes :



#### II-4. Activité pouzzolanique:

L'activité pouzzolanique c'est l'aptitude d'un matériau à fixer l'hydroxyde de calcium et durcir sous l'eau à des températures ordinaires et en un temps raisonnable. Cette propriété se constate à des degrés variables pour des matériaux riches en silice libre, qu'ils soient d'origine naturelle (gaize, diatomites, cendres volcaniques...) ou artificielle (Cendres volantes, fumée de silice, argile calcinée...).

L'activité pouzzolaniques se caractérise par deux aspects distincts :

- ❖ La quantité totale d'hydroxyde de calcium qu'une pouzzolane est capable de fixer.
- ❖ La rapidité de fixation de l'hydroxyde de calcium par la pouzzolane [MAS 76].

Les différents matériaux pouzzolaniques décrits ci-dessus possèdent tous la propriété, selon la définition, de réagir avec l'hydroxyde de calcium, en présence d'humidité, pour former des composés possédant des propriétés liantes. L'influence de la silice et de l'alumine ne peut pas être négligée, la silice participe dans le mélange par la fixation de la chaux et l'alumine augmente la résistance mécanique du matériau à court terme.

##### II-4-1. Evaluation de l'activité pouzzolaniques :

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour évaluer la réactivité d'une pouzzolane comme étant un matériau naturel ou artificiel riche en silice et l'alumine capable de :

- ❖ Réagir avec la chaux en présence d'eau,
- ❖ Former par cette réaction des produits aux propriétés liantes.

A partir de cette définition, on distingue trois catégories d'essais qui, en premier lieu caractérisent l'existence de la réaction pouzzolaniques, et en second lieu, mettre en évidence les produits d'hydratation aux propriétés liantes et leur influence sur les caractéristiques mécaniques.

La première catégorie se base essentiellement sur les déterminations chimiques, tandis que les deux autres s'appuient sur les méthodes physiques et celles mécaniques [ISO 68].

##### a. Méthode chimique :

###### ❖ Test de Chapelle

La détermination du pouvoir pouzzolanique de ces matériaux s'effectue à l'aide de l'essai Chapelle modifié selon la norme NF P 18-513. L'essai consiste à déterminer la quantité d'hydroxyde de calcium fixé par le matériau. Pour cela, on fait réagir pendant 16h à 90 °C 1 g de matériau avec 2 g de CaO dans 250 ml d'eau. La chaux non combinée est ensuite dosée.

On en déduit une quantité de  $\text{Ca(OH)}_2$  fixée exprimée en mg de  $\text{Ca(OH)}_2$  par gramme de matériau. Un essai à blanc sans matériau est conduit parallèlement pour servir de référence. Le matériau à étudier doit être broyé à 315  $\mu\text{m}$ . La Figure II- 4 présente le montage de l'essai Chapelle. Le pouvoir pouzzolanique du matériau sera prouvé si de la chaux disparaît du milieu réactionnel. La quantité de chaux dosée pour l'essai avec le matériau étudié doit être alors inférieure à la quantité de chaux dosée pour l'essai à blanc [NF P 18-513].

### Légende

- 1-Colonne réfrigérante lisse
- 2-Eau circulante
- 3-Bouchant percé de 2 trous
- 4-Thermomètre
- 5-Erlenmayer
- 6-Barreau aimanté
- 7-Agitateur chauffant
- 8-Eau distillée privée de  $\text{CO}_2$
- 9-CaO
- 10-Métakaolin.

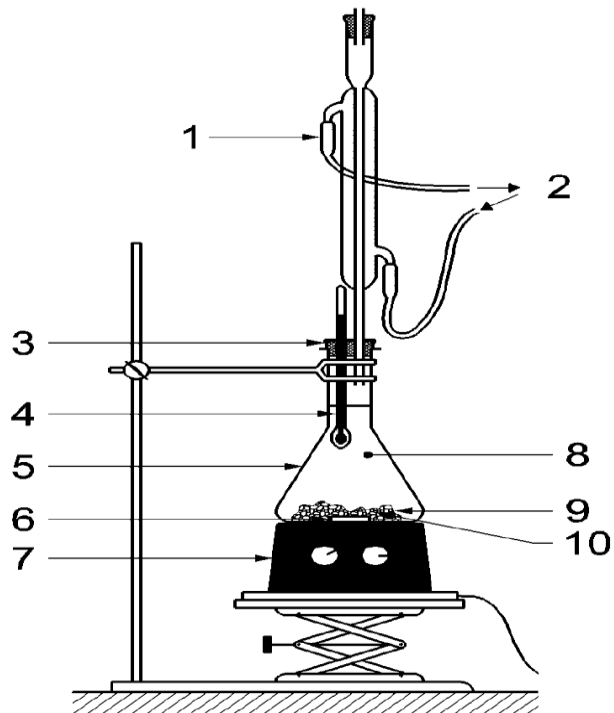


Figure II-4. Montage de l'essai chapelle [NF P 18-513].

### ❖ Test Frattini :

La pouzzolanité est évaluée en comparant la concentration en ions calcium, exprimés sous forme d'oxyde de calcium, présente dans la solution aqueuse en contact avec le ciment hydraté, après une période de temps déterminée, avec quantité d'ions calcium capable de saturer une solution de même alcalinité. On doit considérer que le ciment satisfait à l'essai, c'est-à-dire que le résultat est positif, si la concentration d'ions calcium dans la solution est inférieure à la concentration de saturation.

L'expérience a montré qu'un mélange contenant 20g de ciment et 100 ml d'eau à 40 °C, atteint l'état d'équilibre au bout d'une période comprise entre 8 jours et 15 jours. si le ciment satisfait à l'essai à 8 jours, il n'est pas nécessaire de poursuivre jusqu'à 15 jours.

Sur la figure II.5, sont représentées par un point, les concentrations moyennes d'ions hydroxyle et d'ions calcium (exprimés comme oxyde de calcium) dans la solution. La figure II.5 donne la concentration de saturation d'ions calcium (oxyde de calcium) en fonction de la concentration d'ions hydroxyle à 40° C. La courbe de la figure II.5 peut être exprimée mathématiquement dans la plage de 45 m.mol/l à 90 m.mol/l comme  $[OH]$  par  $[CaO] = 350 / ([OH])$ , où les concentrations d'ions calcium et d'ions hydroxyle sont données en millimoles par litres.

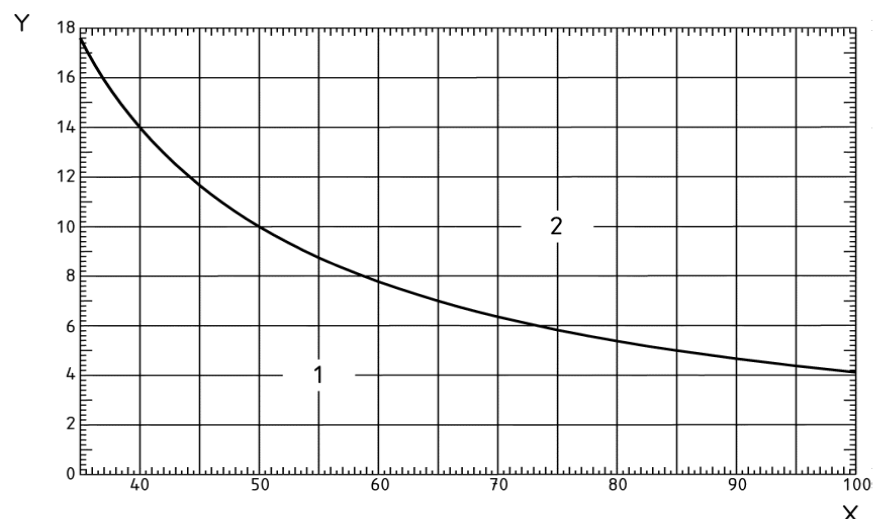
Le ciment satisfait à l'essai de pouzzolanité lorsque le point tracé se trouve au dessous de la courbe de concentration de saturation d'ions calcium (exprimée en oxyde de calcium) de la figure II-5[NF EN 196-5].

1- Satisfait à l'essai

2- Ne satisfait pas à l'essai

3- Concentration en ions hydroxyle (m.mol /l)

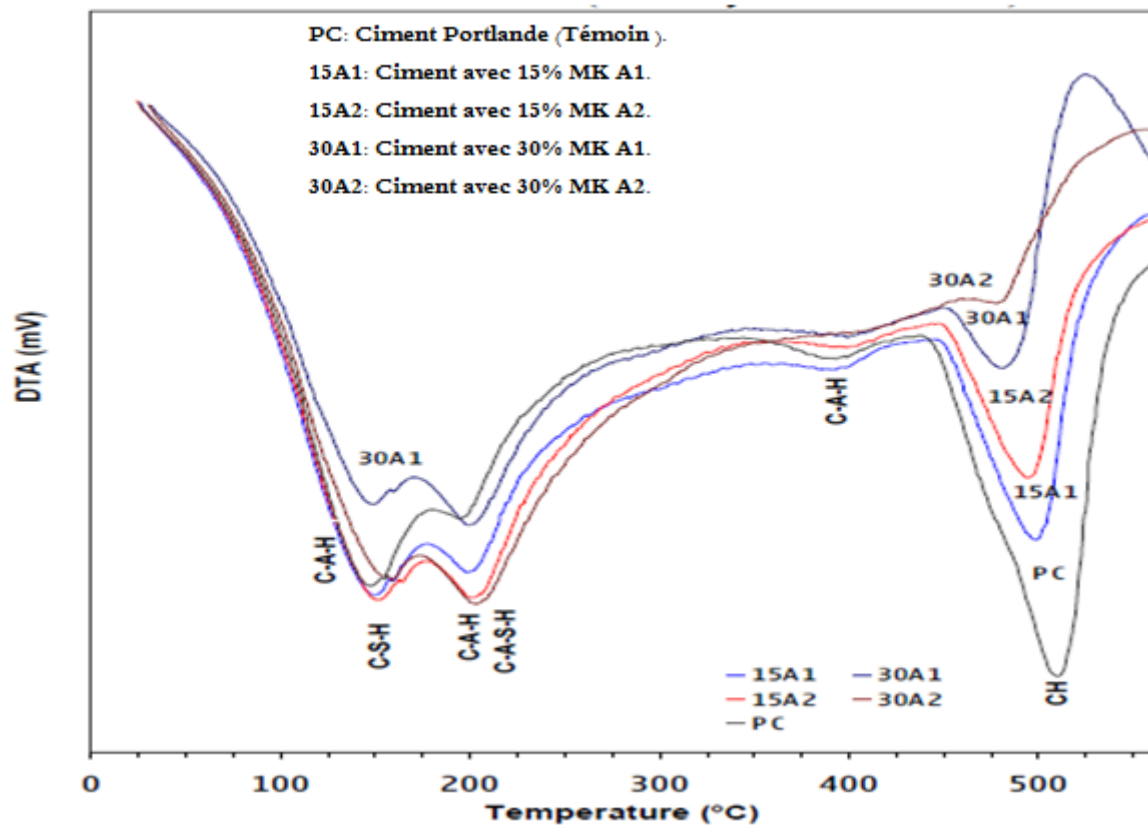
4- Concentration en ions calcium (m.mol /l)



**Figure II-5.** Digramme d'évaluation de la pouzzolanité [NF EN 196-5].

### b. Méthode physique

La présence d'une pouzzolane dans une matrice cimentaire affecte sensiblement les caractéristiques résiduelles du matériau au cours de l'hydratation et après durcissement. L'influence de la pouzzolane est en lien direct avec son degré d'activité, ce qui met en cause les résultats finaux. L'évaluation de l'activité pouzzolanique peut se faire à travers l'une des méthodes physiques connues : DRX [ANT 12], ATD/ATG [TIR 15] ou Calorimétrie [SNE 16]. Un matériau très réactif peut aboutir à des teneurs en Portlandite proches de zéro [TIR 15]. D'autres méthodes physiques telles que la RMN et l'IRTF peuvent être utiles, mais le recours à ces dernières reste très limité.



**Figure II-6.** Utilisation de l'ATD pour l'évaluation de la réactivité d'une pouzzolane [TIR 15].

### c. Méthode mécaniques :

D'un point de vue mécanique, la consommation de la Portlandite par la pouzzolane donne naissance à des nouvelles phases liantes (C-S-H, CAH et CASH), ce qui se traduit par une augmentation, généralement tardive (au-delà de 14 jours) dans la résistance mécanique. L'évolution de la résistance mécanique peut présenter un indice très pertinent sur le degré de réactivité d'une pouzzolane [HAB 08]. Selon la norme ASTM C 618, une pouzzolane (utilisée à 20% de substitution du ciment) est considérée comme réactive, si elle peut garantir au moins 75% de la résistance mécanique à 28 jours du témoin (100% de ciment CEM I). La réaction pouzzolanique améliore également certaines performances des pâtes et des mortiers, tels que la chaleur d'hydratation, la porosité, la résistance au gel/dégel, la résistance au feu, la durabilité, etc. Ce qui permet, à travers leur suivi, de déterminer d'une manière aussi bien qualitative que quantitative, le degré d'activité d'une telle pouzzolane.

**CONCLUSION :**

Vu que l'effet pouzzolanique pouvait être obtenu non seulement à partir des matériaux naturels notamment d'origine volcanique et d'origine sédimentaire mais aussi à partir de matériaux artificiels tels que : cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumée de silice et autres, la pouzzolane en générale, se définit comme étant un ajout minéral actif d'origine naturelle ou artificielle, riche en silice et en alumine.

Les pouzzolanes naturelles sont des produits émis essentiellement par une lave vitreuse. On peut citer comme produit provenant généralement d'une lave vitreuse, les formations volcaniques.

Selon beaucoup de chercheurs, la réaction pouzzolanique est liée à certaines exigences chimiques et physiques. En effet l'activité pouzzolanique est vérifiée par le taux de fixation de la chaux et le temps nécessaire qu'il faut. On distingue trois catégories d'essais qui caractérisent les propriétés des pouzzolanes, comme étant un matériau riche en silice et l'alumine capable de réagir avec la chaux et former des produits aux caractères liant, de sorte à influencer les caractéristiques mécaniques. Ces essais se basent essentiellement sur les déterminations chimiques, et s'appuie sur les méthodes physiques et mécaniques.

**CHAPITRE03 :**  
**ETUDE**  
**EXPERIMENTALE**

**INTRODUCTION :**

Cette partie décrit la campagne expérimentale effectuée à l'occasion de ce travail, ainsi que les propriétés chimiques, physiques et mécaniques du ciment Portland étudié. Dans cette partie nous exposons également les résultats obtenus pour la caractérisation des matériaux utilisés dans la fabrication des différents ciments et mortiers.

Nous avons effectué une série d'essais chimiques, physiques et mécaniques sur les matériaux d'étude et sur les mortiers élaborés à partir de ces derniers. Ces essais ont été effectués dans le laboratoire de contrôle qualité de Lafarge Holcim M'sila (Hammam Dalâa) dans les conditions normalisées.

**III-1. Caractéristiques des matériaux utilisés :****III-1-1. Ciment Portland (CEM I) :**

Le ciment portland (CEM I), utilisé dans cette étude, est un ciment CRS qui provient de la cimenterie de Hammam Dalâa. Il est constitué de 95% de clinker et 5% de gypse. Sa composition chimique ainsi que ses caractéristiques physiques sont présentées dans les tableaux suivants:

**Tableau III-1.** Compositions chimique et minéralogique du CEM I.

Éléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CL	PAF
(%)	21,36	3,87	4,53	62,46	1,67	2,42	0,57	0,21	0,015	2,59
<b>Compositions minéralogique</b>							<b>C<sub>3</sub>S</b>	<b>C<sub>2</sub>S</b>	<b>C<sub>3</sub>A</b>	<b>C<sub>4</sub>AF</b>
							59.39	16.43	2.59	13.78

**Tableau III-2.** Caractéristiques physique du CEM I.

<b>Masse volumique absolue</b>	<b>3,12 (g /cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Surface spécifique de Blaine</b>	<b>3950 (cm<sup>2</sup> /g)</b>

**III-1-2. Pouzzolane naturelle :**

La pouzzolane, utilisée dans le cadre de cette étude comme ajout au ciment, est récoltée du Béni-Saf. Sa composition chimique et ses caractéristiques physiques sont présentées dans les tableaux III- 3 et III-4 respectivement:

**Tableau III-3.** Compositions chimique de la pouzzolane

Éléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CL	PAF
(%)	44,02	17,07	9,81	10,7	3,57	0,11	0,125	4,1	0,017	5

**Tableau III-4.** Caractéristiques physique de la pouzzolane.

Masse volumique absolue	2,7(g/cm <sup>3</sup> )
Surface spécifique de Blaine	4328(cm <sup>2</sup> /g)

**III-1-3. Fumée de silice :**

La Fumée de silice, utilisée dans le cadre de cette étude provient du groupe GRANITEX de Oued Essemmar. Sa composition chimique et ses caractéristiques physiques sont présentées dans les tableaux III-5 et III-6.

**Tableau III-5.** Compositions chimique de la Fumée de silice.

Éléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CL	PAF
(%)	88,607	0,964	0	0,995	0,104	1,263	0,398	0	0,04	8

**Tableau III-6.** Caractéristiques physique de la Fumée de silice.

Masse volumique absolue	2,25(g/cm <sup>3</sup> )
Surface spécifique de Blaine	3164(cm <sup>2</sup> /g)

**III-1-4. Métakaolin :**

Le métakaolin utilisé dans cette étude comme ajout au ciment a été acquis comme Kaolin de El Milia à Jijel. Il a subi une calcination à 750 °C pendant 5 heures. Sa composition chimique et ses caractéristiques physiques sont présentées dans les tableaux III-7 et III-8.

**Tableau III-7.** Compositions chimique du Métakaolin.

Éléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CL	PAF
(%)	66,24	18,77	2,47	1,54	0,06	0,11	3,21	0,25	0,022	9,25

**Tableau III-8.** Caractéristiques physiques du Métakaolin.

Masse volumique absolue	2,4 (g/cm <sup>3</sup> )
Surface spécifique de Blaine	4432 (cm <sup>2</sup> /g)

**III-2. Formulation des ciments :****III-2-1. Composition pondérale des différentes variantes de ciment :**

Les ciments utilisés dans tous les essais ont été préparés au niveau du laboratoire de la cimenterie de Lafarge M'sila (Hammam Dalâa). Leurs composants (CRS, pouzzolane naturelle, fumée de silice et métakaolin) ont été broyés séparément dans un broyeur à boulets. Ces matériaux ont été mis dans des sacs puis mélangés, selon des proportions bien définies, afin d'obtenir des produits plus ou moins homogènes. Les différentes variantes de ciment sont résumées dans le tableau III-9.

Dans cette étude, les ajouts: pouzzolane naturelle, fumée de silice et méta kaolin sont substitués en différents pourcentages (5%, 10% et 20%), dans le but d'étudier l'influence de l'effet de ces ajouts pouzzolaniques sur l'évolution des propriétés d'une matrice cimentaire. Pour avoir une idée approfondie sur cette influence, l'étude concernera les ciments anhydres, les pâtes de ciment ainsi que les mortiers normalisés.

**Tableau III-9.** Compositions pondérales des (10) ciments préparés.

Types de ciment	Ciment (%)	Ajouts (%)		
		PZ	MK	FS
CRS (Témoin)	100			
CEM II + PZ-5%	95	5		
CEM II + PZ-10%	90	10		
CEM II + PZ-20%	80	20		
CEM II + MK-5%	95		5	
CEM II + MK-10%	90		10	
CEM II + MK-20%	80		20	
CEM II + FS-5%	95			5
CEM II + FS-10%	90			10
CEM II + FS-20%	80			20

**III-3. Essais sur ciments anhydres :****III-3-1. Analyse chimique par fluorescence X (FRX) [NF P 15-467] :**

L'analyse chimique par fluorescence X a été effectuée au laboratoire de la cimenterie Lafarge M'sila (Hammam Dalâa). Cette analyse a été conduite sur les différents matériaux (CRS, pouzzolane naturelle, fumée de silice et méta kaolin). La méthode d'analyse par spectrométrie de fluorescence des rayons X a pour objectif la détermination des éléments que contient un matériau.

**• Mode opératoire :**

- ✓ Préparation de l'échantillon en principe sous forme de poudre.
- ✓ Peser, à 0.0001g près, la quantité d'échantillon à analyser en fonction des dimensions de la perle du spectromètre.
- ✓ Le mélange homogénéisé est déposé dans le creuset de fusion et amené jusqu'à la fusion complète. Une agitation périodique du creuset permet d'homogénéiser le liquide formé.
- ✓ Le verre obtenu est refroidi jusqu'à ce que la perle se détache du moule, puis la perle démoulée est laissée jusqu'à l'équilibre avec la température ambiante.
- ✓ En dernière étape, on procède à l'analyse par fluorescence X en utilisant le programme correspond à l'échantillon à analyser.

**III-3-2. La Masse volumique absolue [NF P94-054] :**

Il s'agit de déterminer la masse volumique absolue (ou poids spécifique) de ciments utilisés dans notre étude. La technique expérimentale utilisée est celle du pycnomètre.

**Mode opératoire :**

- ✓ Peser 64 g de ciment
- ✓ Introduire le déliant (liquide non réactif avec le ciment) jusqu'à la graduation inférieure trait marqué 0 soit  $V_0$
- ✓ Placer le densimètre dans un bain thermostatique à température constante ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ )
- ✓ Attendre 20 minutes et corrigé le niveau si nécessaire après stabilisation de la température.
- ✓ Introduire la poudre de ciment dans le densimètre
- ✓ Agiter doucement en faisant tourner le densimètre pour chasser l'air entraîné par la poudre
- ✓ Remettre le densimètre dans le bain thermostatique.
- ✓ Après stabilisation du niveau lire le volume après introduction du ciment dans le densimètre soit  $V_1$
- ✓ Calculer de la masse volumique absolue par la relation:  $\rho = M / (V_1 - V_0)$ .

**III-3-3. Mesure la surface spécifique de Blaine SSB [EN 196-6] :**

La surface spécifique (finesse Blaine) permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment (norme NF EN 196-6). Elle s'exprime en  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2800 et 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

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

- **Mode opératoire :**

- ✓ Tapoter tout doucement la cellule pour niveler la couche supérieure du ciment.
- ✓ Placer un autre papier filtre au dessus de la couche.
- ✓ Tasser avec précaution à l'aide du piston réservé à cet effet.
- ✓ Vérifier le niveau d'huile qui doit être au trait (1) dans le tube.
- ✓ A l'aide de la poire aspirante pomper et ouvrir le robinet, l'huile remonte à la graduation (4).
- ✓ Fermer le robinet, puis laisser le liquide descendre doucement.
- ✓ Mesurer le temps de passage d'huile de trait 2 au trait 3.
- ✓ Lire directement en fonction du temps, sur le tableau donnant SSB en fonction du temps, la valeur de la surface spécifique Blaine, ou appliquer la formule ci-dessous :

$$S = \frac{K}{\rho} \times \frac{\sqrt{e^3}}{(1-e)} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0,1\eta}} \text{ (cm}^2/\text{g)}$$

Avec :

T: Temps moyen de passage de l'aire à travers la couche de ciment (en s).

K: Constante d'étalonnage de l'appareil. (K= 2.106)

$\rho$  : Densité de ciment (l'échantillon) g/cm<sup>3</sup>.

$\eta$  : Viscosité de l'aire à température d'essai ( $\eta = 0.00001824$  Pa. s)

e : Porosité d'échantillon (pour les ciment e= 0.500).

### III-4. Essai sur pâtes de ciment :

#### III-4-1. Essai de consistance [NF EN 196-3] :

L'essai de consistance normalisée sert à déterminer la quantité d'eau de gâchage optimale pour que la pénétration d'une aiguille de l'appareil de Vicat, dans une pâte de ciment, soit de l'ordre de 6±2 mm (EN 196-3). La consistance a été évaluée en mesurant l'enfoncement d'une aiguille cylindrique de  $\varnothing = 10$  mm sous l'effet d'une charge constante (300 g). L'enfoncement est d'autant plus rapide et important que la consistance est plus fluide.

- **Mode opératoire :**

- ✓ Peser 500 g de ciment à ±1 g près.
- ✓ Prendre certaine quantité d'eau, par exemple 125 g. Ajouter soigneusement le ciment à l'eau entre  $5 \leq \text{temps} \leq 10$  secondes. Mettre le malaxeur en marche immédiatement de 3 minutes.

- ✓ Introduire immédiatement la pâte dans le moule, et le remplir sans tassements ni vibrations excessives. avec un outil présentant un bord droit de façon à avoir la face supérieure de la pâte lisse.
- ✓ Régler l'appareil de Vicat au préalable muni de la sonde. Placer le moule et la plaque de base sur l'axe de la sonde de l'appareil de Vicat et libérer les parties mobiles de la sonde .Effectuer la lecture de l'échelle a la fin de pénétration ou 30 secondes après la libération.
- ✓ La lecture doit être acceptée si elle est de  $(6 \pm 2 \text{ mm})$  du bord inférieur de la sonde de la surface inférieure de la pâte.

#### III-4-2. Essais de prise [NF EN 196-3] :

Le début de prise correspond au moment où l'on constate une augmentation relativement brusque de la viscosité de la pâte de consistance normalisée avec échauffement. L'appareil utilisé est l'appareil de Vicat équipée d'une aiguille de Vicat (manuel et automatique). Quand la partie mobile est libérée l'aiguille s'arrête à une distance  $d$  du fond du moule telle que  $d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ .

La fin de prise correspond au moment où la pâte est devenue un bloc rigide, le moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte que de 0,5 mm.

- **Mode opératoire :**

- ✓ confectionner une pâte normalisée comme indiqué à III-4-1 pour l'essai de consistance.
- ✓ Mettre le moule dans l'armoire en attendant, que la prise soit commencée.
- ✓ Quand le moment supposé du début de prise, immobiliser l'aiguille au contact de la pâte jusqu'à ce que  $d = 4 \pm 1 \text{ mm}$ .

On retourne le moule tronconique utilisé pour la détermination du début de prise de façon que les essais de fin de prise soient faits sur la face du moule en contact avec la plaque de base.

#### III-4-3. Essai de stabilité ou l'expansion des Chatelier [NF EN 196-3] :

L'essai consiste à mesurer l'augmentation de volume provoquée lors de la réaction d'hydratation par la présence de l'oxyde de calcium ou de magnésium contenu dans les ciments étudiés. Elle consiste à faire accélérer la réaction d'hydratation par un traitement thermique de la pâte pour pouvoir observer une expansion éventuelle des cinq types de ciment testé.

- **Mode opératoire :**

- ✓ La pâte de consistance normalisée est introduite dans les deux moules en laiton. Conservation des moules pendant 24h dans l'armoire humide.
- ✓ Au bout de ce temps on mesure à 0.5 mm près l'écartement **A** des pointes des aiguilles. Le moule est entreposé dans la bouilloire pendant  $3h \pm 5mn$  à une température d'ébullition. Soit **B** l'écartement au bout de ce temps des pointes des aiguilles et soit **C** l'écartement après refroidissement à 20°C. La stabilité est caractérisée par la valeur C-A :
  - Stabilité = C-A
  - Expansion = B-A

### III-5. Essais sur mortiers :

#### III-5-1. Mortier normalisé [NF EN 196-1] :

Dans le but de suivre l'effet des différents ajouts sur les mortiers normalisés, des éprouvettes contenant un mélange de ciment, pouzzolane naturelle, fumée de silice et méta kaolin ont été coulées selon la norme **NF EN 196-1**:

- Ciments étudiés = 450 g.
- Sable normalisé = 1350 g.
- Eau de gâchage = 225 g.

Les matériaux utilisés lors de cette confection sont :

- **Le ciment :** 10 ciments préparés au niveau du laboratoire.
- **Sable normalisé :** Le sable utilisé est un sable normalisé, certifié conforme à ISO 679 :2009 et EN196-1. Il s'agit d'un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun  $1\ 350 \pm 5$  g.
- **L'eau de gâchage :** L'eau utilisée pour la confection des mortiers est une eau distillée, préparée au laboratoire Lafarge Holcim M'sila (Hammam Dalâa). Le laboratoire où a lieu la préparation des éprouvettes doit être maintenu à une température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  et à une humidité relative supérieure ou égale à 50 %.
- **Mode opératoire :**
  - ✓ Préparation des mortiers, un gâchée pour trois éprouvettes.
  - ✓ Malaxer chaque gâchée de mortier mécaniquement au moyen du malaxeur. Le malaxage est effectué suivant la norme NF EN 196-1 dans le **Tableau III.10**.
  - ✓ Préparation des éprouvettes de forme prismatique de dimensions  $(4 \times 4 \times 16)$  cm<sup>3</sup> selon la norme **EN 196-1**.

- ✓ Mouler les éprouvettes immédiatement après préparation du mortier en deux couches à l'aide d'une table à choc ou table Vibrante.
- ✓ La surface supérieure arasée avec règle métallique pour lisser la surface des éprouvettes.
- ✓ Elles sont stockées dans leurs moules pendant 24 heures dans une chambre d'humidité de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  et une humidité de 50%.
- ✓ Démouler les éprouvettes et conservées dans l'eau, La température de l'eau dans les récipients de conservation doit être maintenue à  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .
- ✓ Avant d'effectuer les essais, les éprouvettes sont exposées à l'air libre pendant 20 minutes pour qu'elles acquièrent l'état normal d'humidité.
- ✓ Les essais mécaniques ont lieu sur 3 éprouvettes et sont testés en flexion et en compression à 2, 7 et 28 jours.

**Tableau III.10.** Malaxage du mortier selon la norme 196-1.

Opérations	Introduction Ciment et l'eau	Malaxage	Introduction Du sable	Malaxage gâchée	Raclar le Gâchée	Malaxage gâchée
Durées	5 à 10s	30s	30s	30s	90s	
					30s	60s
Malaxeur	Arrêt	Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêt	Vitesse Rapide

**III-5-2. Retrait et gonflement [NF P15 – 433]:**

L'essai consiste à suivre l'évolution des changements dimensionnels d'une éprouvette de mortier normal conservée à l'air pour le retrait et à l'eau pour le gonflement.

Donc le retrait est une réduction de longueur d'un échantillon provoqué par la dessiccation, le gonflement est une augmentation de longueur d'un échantillon provoqué par l'immersion dans l'eau. Trois prismes ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ) sont préparés pour chaque essai de retrait et de gonflement. Après le démoulage des l'éprouvettes on procède immédiatement à la mesure de sa longueur puis à 3,7 et 28 jours.

• **Mode opératoire :**

Régler le comparateur à zéro juste au moment du démoulage de l'éprouvette sur la tige en invar de 160mm de longueur, soit  $L_0$  la mesure de l'éprouvette. Soit  $dl(t)$  la valeur lue sur le comparateur au temps  $t$  (3,7 et 28 jours), la longueur de l'éprouvette est:

$$L(i) = L_0 + \Delta L$$

**L(i)**: Longueur de l'éprouvette à l'instant t=0 ( qui se diffère de 160 mm à cause des défauts du moule).

**ΔL** : différence entre la longueur théorique du moule (160mm) et sa longueur réelle.

Le retrait (ou gonflement) à 3, 7 et 28 jours est donné par la formule:

$$\epsilon_l(t) = 1000 \, dL(t) / L(i)$$

Avec: **dL(t)** est la variation de longueur (en μm): **dL(t) = L(t) - L(i)**

- Si les éprouvettes sont conservées dans l'air, **dL(t)** est **négatif** et on parle de **retrait**.
- Si les éprouvettes sont conservées dans l'eau, **dL(t)** est **positif** et on parle de **gonflement**.

### III-5-3. La Chaleur d'hydratation (La méthode semi-adiabatique) [NF EN 196-9] :

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

L'échauffement qui dépend principalement des caractéristiques du ciment est généralement compris entre 10 K et 50 K.

#### III-5-3-1. Calcul de la chaleur d'hydratation

La chaleur d'hydratation **Q** à l'instant **t** s'écrit (1<sup>er</sup> terme : chaleur accumulée, 2<sup>ème</sup> terme: perte de chaleur vers l'extérieur):

$$q = \frac{C}{m_c} \theta + \frac{1}{m_c} \int_0^t \alpha \cdot \theta \cdot dt$$

Avec :

$$C = 0,75(m_c + m_s) + 3,76.m_e + 1,3.m_b + \mu$$

$$\alpha = a + b.\theta$$

**M<sub>c</sub>, m<sub>s</sub>, m<sub>e</sub>, m<sub>b</sub>** : masse de ciment, de sable, d'eau dans l'éprouvette et de la boîte [g]

**t** : durée d'hydratation [h]

**C** : capacité thermique du calorimètre [J °C<sup>-1</sup>]

**α** : coefficient de déperdition thermique du calorimètre [J h<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>]

**θ** : échauffement de l'éprouvette à l'instant t (différence entre la température de l'éprouvette et la référence) [°C]

**μ** : capacité thermique du calorimètre vide [J °C<sup>-1</sup>]

a, b : paramètre spécifique d'étalonnage du calorimètre.

- **Mode opératoire:**

La composition du mortier doit être conforme à l'EN 196-1 et l'échantillon pour essai doit avoir une masse totale de  $(1\,575 \pm 1)$  g. Chaque gâchée de mortier doit être constituée de  $(360,0 \pm 0,5)$  g de ciment;  $(1\,080 \pm 1)$  g de sable normalisé CEN conforme aux exigences de l'EN 196-1 et  $(180,0 \pm 0,5)$  g d'eau distillée.

Comme il n'est pas possible de récupérer la totalité des matériaux versés dans le récipient du malaxeur, il convient que la gâchée de mortier soit légèrement supérieure à 1 575 g, les proportions en masse des divers constituants étant maintenues. Aussitôt après la fabrication du mortier :

- ✓ peser la boîte vide
- ✓ mettre le mortier dans la boîte et peser le tout
- ✓ installer la sonde de température
- ✓ fermer le calorimètre
- ✓ mettre en fonction l'acquisiteur de données (mesure du temps et de la température de référence et des températures des calorimètres).

#### **III-5-4. Résistance à la compression [NF EN 196-1] :**

La machine d'essai pour la détermination de la résistance à la compression doit avoir une capacité adaptée à l'essai, elle doit avoir une précision de  $\pm 1,0$  % de la charge enregistrée. Elle doit être équipée d'un dispositif indicateur conçu de telle façon que la valeur enregistrée à la rupture de l'éprouvette reste indiquée après le retour à zéro de la charge. Ceci peut être obtenu par l'utilisation d'un indicateur de maximum sur une jauge de pression ou d'une mémoire sur un afficheur numérique.

Les machines d'essai à fonctionnement manuel doivent être pourvues d'un dispositif de gradation pour faciliter le contrôle de la montée en charge. L'axe vertical du piston doit coïncider avec l'axe vertical de la machine et, pendant la mise en charge, le déplacement du piston doit se faire suivant l'axe vertical de la machine. De plus, la résultante des forces doit passer par le centre de l'éprouvette.

Les essais de compression ont été effectués sur une presse de type Perrier d'une charge de 200KN asservie en chargement de  $2400\text{N/s} \pm 200\text{N/s}$ . Pour chaque essai, les 6 demi-éprouvettes obtenues après l'essai de flexion ont été testées. La valeur retenue présente la moyenne des six.

**CONCLUSION:**

Dans cette partie, nous avons exposé les différentes méthodes d'analyses (chimiques, physiques et mécaniques) utilisées pour la caractérisation des matériaux, des ciments anhydres, des pâtes de ciment et des mortiers normalisés étudiés dans le cadre de cette recherche. Il est à noter que ces méthodes d'essai sont basées, pour la plus part des cas, sur les normes algériennes (NA) et européennes (NF) utilisées dans le domaine de l'industrie cimentaire.

**CHAPITRE04 :**  
**RESULTATS ET**  
**INTERPRETATION**

**INTRODUCTION :**

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des différents essais effectués sur des ciments anhydres, pâtes de ciment et mortiers normalisés, confectionnés à partir des différentes combinaisons d'ajouts (Pouzzolane Naturelle, Fumée de silice et Métakaolin) et différents pourcentages (5%,10% et 20%).

**IV-1. Les essais sur ciments anhydres :****IV-1-1. Analyses chimiques des différents ciments préparés :****Tableau IV-1.** Analyses chimiques par XRF des ciments préparés.

Élément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl	Paf
CRS (Témoin)	21,36	3,87	4,53	62,46	1,67	2,42	0,57	0,21	0,015	2,59
CEM II + PZ-5%	22,81	4,61	4,82	59,71	1,66	1,8	0,62	0,65	0,011	3,02
CEM II + PZ-10%	31,46	3,37	4,04	52,88	1,73	1,28	0,85	0,46	0,01	3,26
CEM II + PZ-20%	26,32	6,64	5,7	52,02	1,97	1,58	0,68	0,43	0,019	3,39
CEM II + MK-5%	24,32	4,71	4,47	59,43	1,51	1,83	0,76	0,5	0,013	2,85
CEM II + MK-10%	26,67	5,43	4,35	56,04	1,45	1,38	0,88	0,1	0,012	3,07
CEM II + MK-20%	25,21	5,12	4,52	56,25	1,35	1,71	1,15	0,1	0,015	3,21
CEM II + FS-5%	24,8	3,83	4,84	59,55	1,65	1,48	0,56	0,01	0,047	3,21
CEM II + FS-10%	25,12	3,08	4,25	60	1,83	1,93	0,86	0,25	0,06	3,3
CEM II + FS-20%	26,02	5,33	5,13	57,28	1,766	1,75	0,64	0,97	0,063	3,03

Les résultats des analyses chimiques des 10 variantes de ciments sont présentés dans le Tableau IV-1. A partir de ces résultats on constate que les teneurs des ciments en oxydes de silice (SiO<sub>2</sub>) d'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) sont en augmentation avec l'augmentation de leurs teneurs en ajouts. Ces augmentations sont certainement dues à la richesse des différentes pouzzolanes en ces composants nécessaires pour leur réactivité. Une très légère augmentation de la somme des teneurs en alcalis (K<sub>2</sub>O et Na<sub>2</sub>O) a été également remarquée en augmentant le taux de substitution. Les mêmes tendances ont été remarquées en matière des PAF. Contrairement aux teneurs en CaO et SO<sub>3</sub> qui ont été en diminution absolue ce qui est attribué

à la pauvreté de nos ajouts en chaux et en gypse. Le manque en gypse peut avoir des effets négatifs sur la prise des ciments. Ces variations peuvent jouer un rôle défavorable dans les caractéristiques mécaniques attendues pour les pâtes et les mortiers, notamment en matière de prise, de résistance et de variation dimensionnelle.

Il est à noter que nos ciments restent conformes à la norme NF 197-1 du fait que leur teneur en  $\text{SO}_3$ , en  $\text{MgO}$  restent inférieures à 3,5% et 5% respectivement. Les rapports massiques ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) de toutes les variantes sont également supérieurs à 2.

#### IV-1-2. Influence des pouzzolanes sur la masse volumique des ciments :

La Figure IV.1 présente l'effet des différentes pouzzolanes (nature et pourcentage) sur la masse volumique du ciment. Au vue de ces résultats nous remarquons que:

- La masse volumique des ciments est en diminution absolue avec l'incorporation des différents ajouts quelque soit leur pourcentage. Une très légère diminution a été obtenue pour les taux de substitution de 5% (0,64% pour le MK et la FS et 0,32% pour la PZ), alors que la diminution la plus importante a été 1,92%, obtenue en remplaçant 20% du CRS par la FS.
- La chute dans la masse volumique est de plus en plus importante qu'il y a d'ajout dans le ciment, et ceci quelque soit la nature de la pouzzolane incorporée. La PZ semble avoir la plus faible influence, du fait que les baisses n'étaient que 0,32%, 0,96% et 1,28% pour 5, 10 et 20% d'incorporation respectivement. Cependant, les mêmes remplacements ont conduits à des chutes de l'ordre 0,64%, 1,28% et 1,92% de dans le cas de FS.

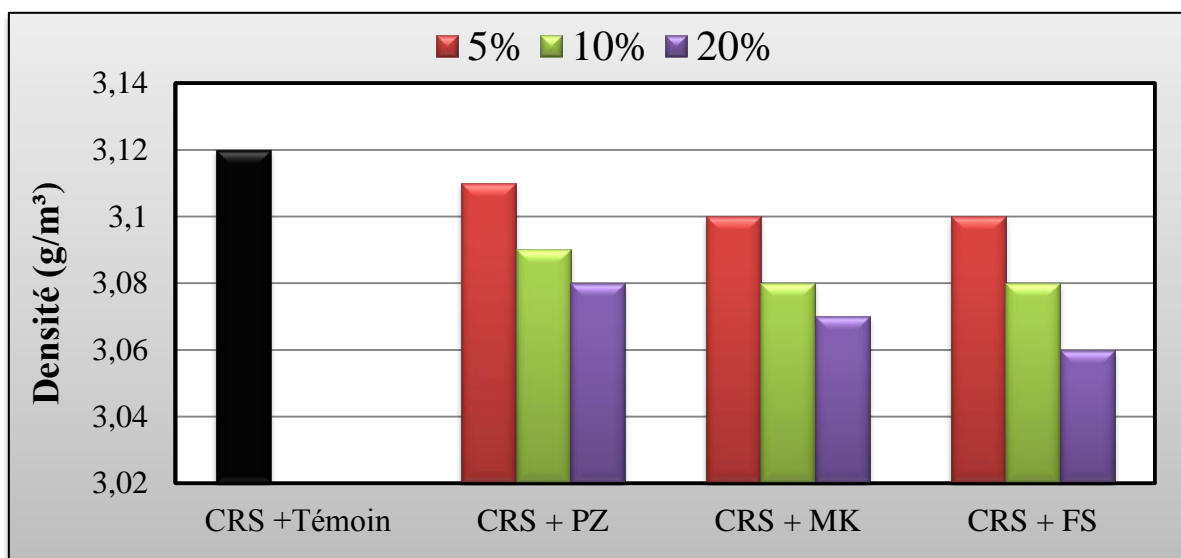


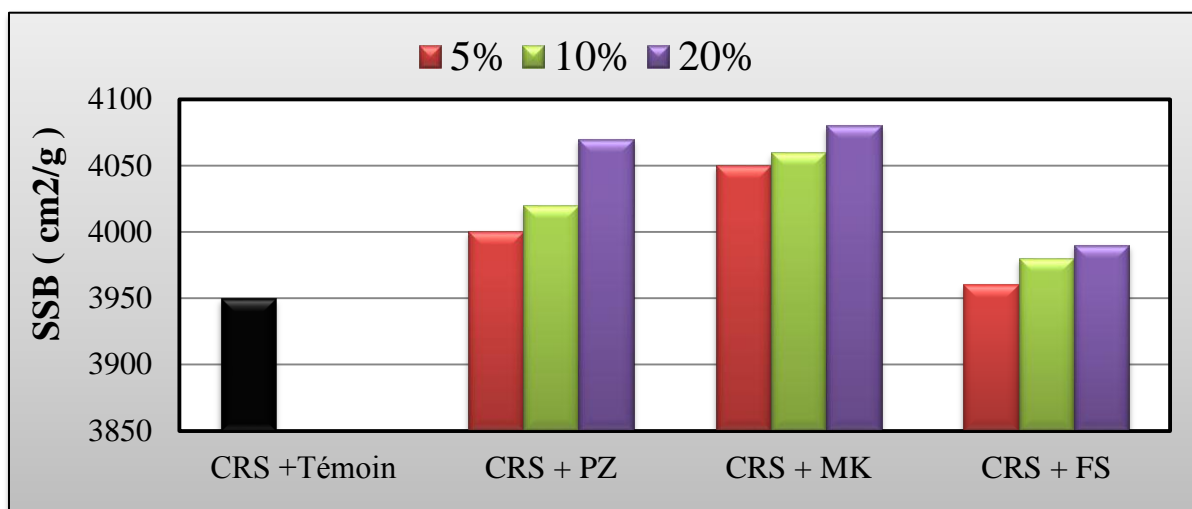
Figure IV-1. Variation de la masse volumique des ciments en fonction des ajouts.

Ces résultats peuvent être attribués à la différence de densité entre le ciment CRS ( $3,12 \text{ g/cm}^3$ ) et les différents ajouts pouzzolaniques (PZ :  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , FS :  $2,25 \text{ g/cm}^3$  et MK :  $2,4 \text{ g/cm}^3$ ). On note ici que la loi des mélanges est globalement respectée, du fait que la masse volumique contenant par exemple 90 % de CRS et 10 % de PZ égale à  $3,08 \text{ g/cm}^3$ , ce qui est très proche du résultat expérimental ( $3,09 \text{ g/cm}^3$ ).

#### IV-1-3. Influence des pouzzolanes sur la surface spécifique (SSB) des ciments :

La Figure IV.2 présente l'effet de la nature et du pourcentage de l'ajout pouzzolanique sur la surface spécifique (SSB) du ciment. A partir de ces résultats, nous pouvons dire :

- La surface spécifique de Blaine des ciments est en augmentation absolue avec l'incorporation des différents ajouts quelque soit leur pourcentage. Cette augmentation a atteint 0,25% pour une substitution de 5% de FS, 1,77% pour 10% de PZ et 3,29% pour 20% de MK.
- L'augmentation du taux d'incorporation avait un effet favorable sur la SSB des ciments quelque soit le type d'ajout. C'était le MK qui a abouti à des SSB plus importantes et ceci pour tous les pourcentages.
- Ces résultats sont attribués à la différence de finesse entre le ciment CRS ( $3950 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) et les différentes pouzzolanes ( $3164 \text{ cm}^2/\text{g}$  pour la FS,  $4328 \text{ cm}^2/\text{g}$  pour la PZ et  $4432 \text{ cm}^2/\text{g}$  pour le MK).
- Il est à noter que ces petits écarts entre la finesse du ciment témoin CRS et celles des ciments modifiés ont été visés dans le but de réduire l'effet de pouzzolanité physique de nos ajouts.



**Figure IV.2.** Variation de la surface spécifique SSB des ciments en fonction des ajouts.

- Nos résultats expérimentaux sont en concordance avec ceux théoriques obtenus par la loi des mélanges sauf pour la variante de FS. La contradiction des résultats de cette variante peut s'expliquer par la mauvaise homogénéisation des échantillons soumis à cet essai.

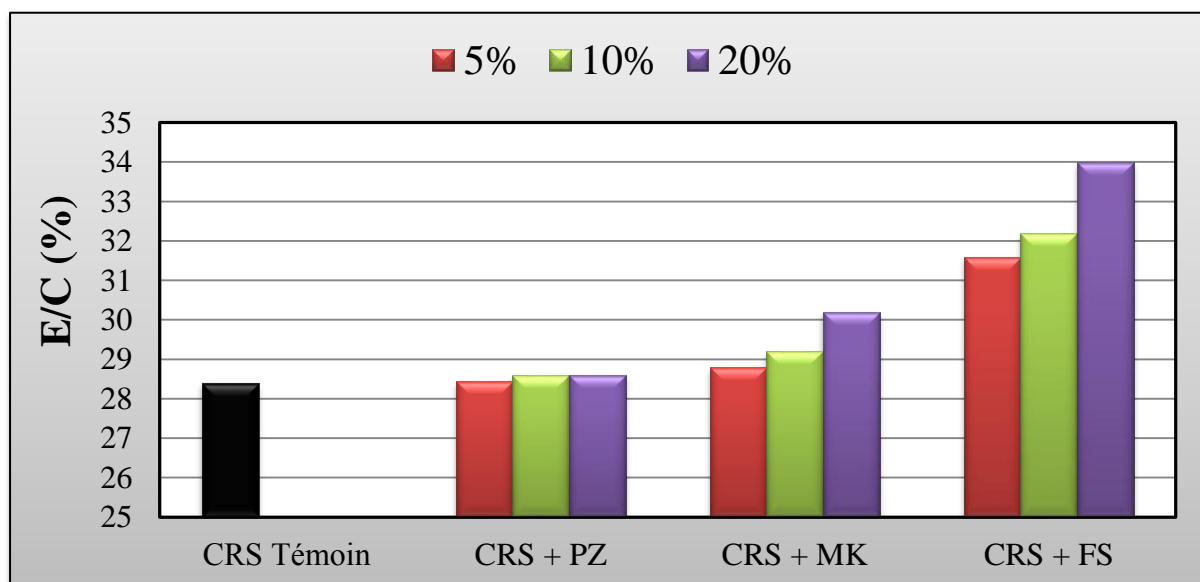
## IV-2. Les essais sur pâtes de ciment :

### IV-2-1. Influence des pouzzolanes sur la consistance (E/C) des ciments :

Les résultats obtenus pour l'essai de consistance (Figure IV-3) montrent que la demande en eau, nécessaire pour avoir une consistance normalisée, a été en augmentation dans toutes les variantes par rapport au témoin.

A partir de ces résultats on remarque que :

- L'augmentation de la demande en eau augmente quelque soit la pouzzolane utilisée.
- L'augmentation de la demande en eau augmente avec le pourcentage de substitution quelque soit la pouzzolane utilisée.
- L'incorporation de 20% de FS a abouti à une augmentation de 21,13% dans la quantité d'eau contre seulement 10,56% si elle est utilisée à 5%. C'était la PZ qui a nécessité la plus faible augmentation de la quantité d'eau par rapport au témoin, en ajoutant 0,18% d'eau pour une substitution de 5% et 0,7% pour une substitution de 20%.



**Figure IV-3.** Evolution des consistances en fonction de variation des ajouts.

Deux paramètres peuvent être à l'origine de ces résultats: la finesse des ciments et l'absorption des ajouts. Il est connu que la finesse d'un ciment exprime la surface à entourer par les molécules d'eau. Donc, l'augmentation de la finesse conduit à une surface à mouiller

plus importante, d'où un rapport E/C plus élevé. D'autre part, les pouzzolanes sont connues par leur pouvoir absorbant. L'eau destinée principalement au mouillage des grains de ciment et donc leur hydratation, se trouve absorbée par les particules de la pouzzolane. Cette situation a influé sur la maniabilité des pâtes confectionnées, pour atteindre la consistance visée il fallait ajouter de l'eau. La quantité additionnelle d'eau est de plus en plus importante, que la teneur des ciments en ajout augmente.

#### **IV-2-2. Influence des ajouts sur le temps de prise:**

Les résultats obtenus dans la Figure IV-3, montrent une très légère variation dans le temps de prise entre le témoin et les variantes contenant les ajouts pouzzolaniques. On peut dire donc que, malgré les changements dans la nature et le pourcentage de l'ajout, cela n'a pas beaucoup influé sur le temps de prise des pâtes de ciment. Plusieurs paramètres peuvent être à l'origine de ces petites variations, tels que: le rapport E/C, la quantité du clinker, l'absorption des pouzzolanes et la finesse des ciments.

Selon Mounanga [PIE 03], un faible rapport E/C induit une concentration plus élevée de grains solides, ce qui réduit l'espace initial entre les particules de ciment et donc une forte connexion entre les premiers hydrates formés, d'où une cinétique d'hydratation plus rapide et un temps de prise plus faible (cas du témoin avec 225 mn). La variante contenant 20% de FS a nécessité 21,13% d'eau de plus, d'où il fallait attendre 42 minutes supplémentaires pour voir sa prise. A son tour, le manque en clinker n'a pas permis aux variantes des ciments modifiés de produire, dans la même période que le témoin, la quantité d'hydrates capable de déclencher la prise (effet de dilution). A cela s'ajoute le fait que les pouzzolanes sont considérées comme retardateur de prise, du fait que leur grains ne participent pas aux premières réactions d'hydratation [RAC 11]. D'autre part, l'absorption des ajouts et la finesse des ciments résultant peuvent influencer sur les résultats de la prise, du fait que plus les matériaux est absorbant plus, le temps de prise est important. La même tendance est à prévoir en fonction des finesses des ciments.

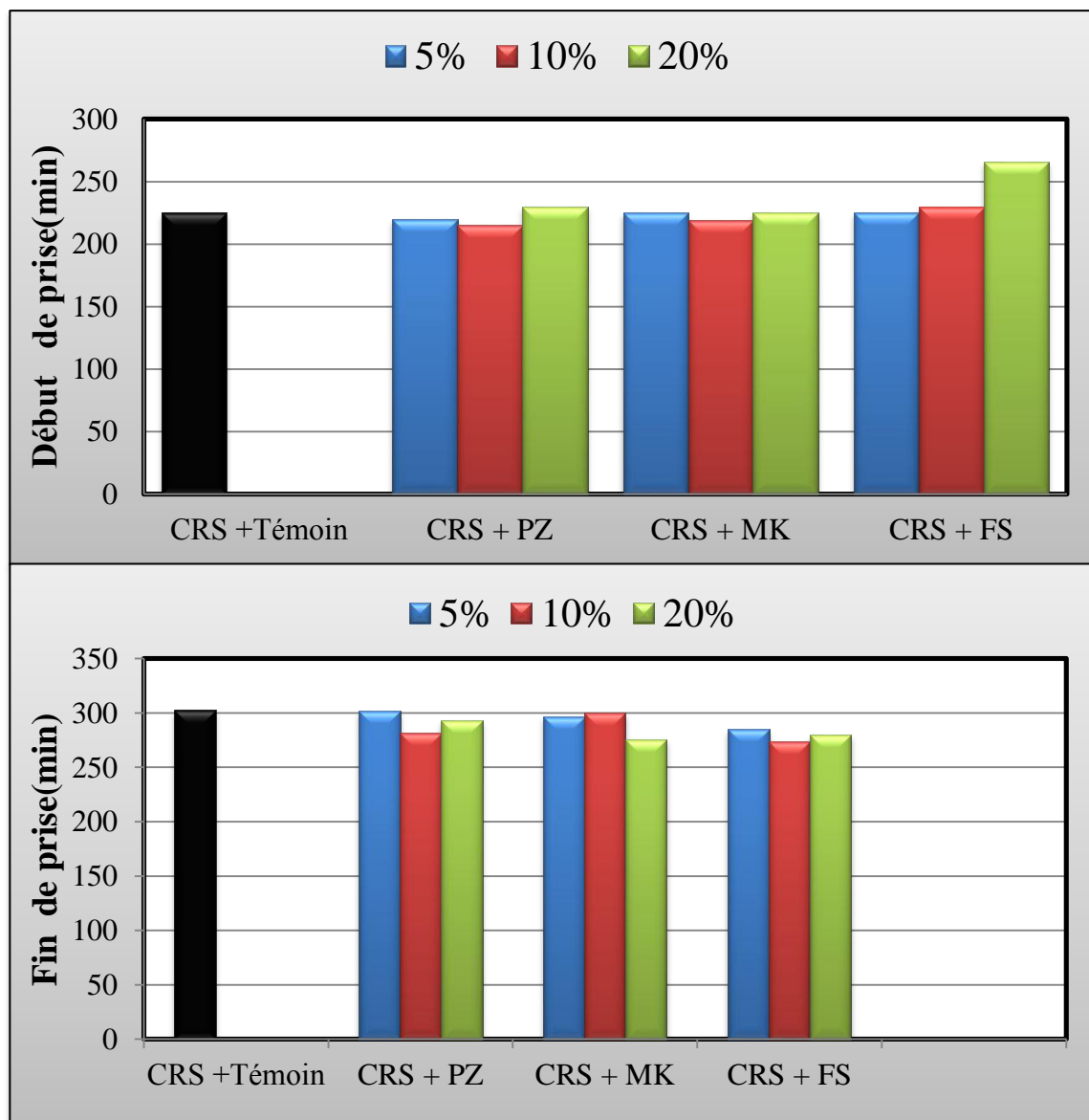
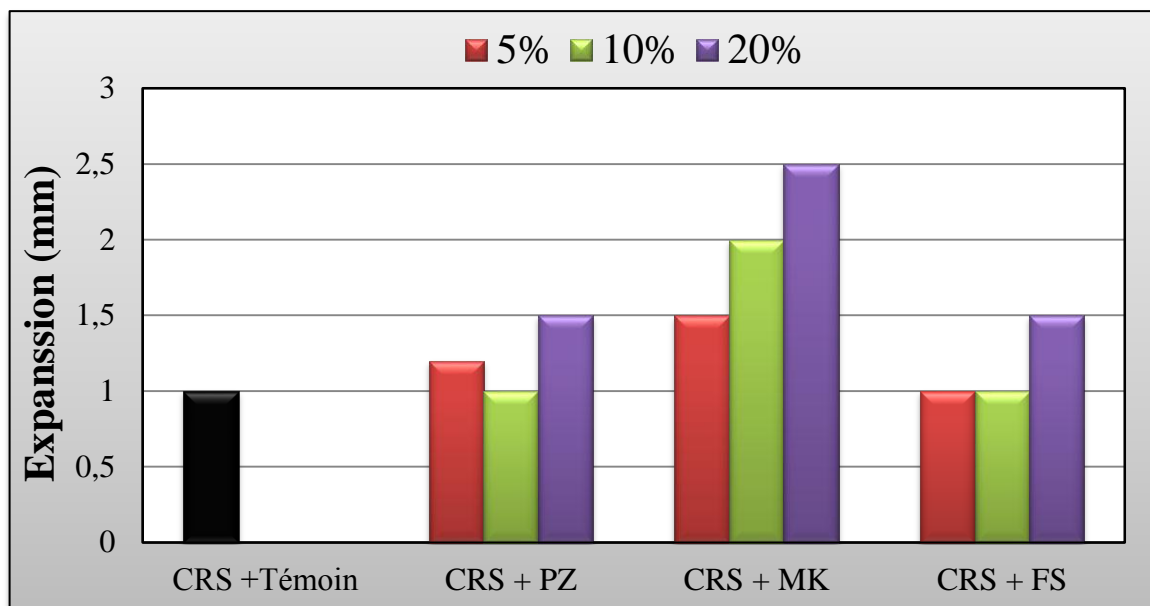


Figure IV.4. Temps de prise des différentes pâtes du ciment

#### IV-2-3. Influence des ajouts sur l'expansion des pâtes de ciment :

Les résultats de (Figures VI-5) indiquent que l'expansion à chaud (hydratation accélérée par traitement thermique à 100° C) augmente avec l'augmentation des pourcentages des ajouts d'une façon relativement linéaire (MK et FS) et dans la PZ on remarque que l'expansion a 10% est diminuée par rapport les autres pourcentages, et n'a pas d'effet significatif sur la stabilité du ciment et reste inférieure à la limite maximale imposée par la norme EN 196-3 qui est de 10 mm.

Cette augmentation de l'expansion 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 et qui donnent généralement une expansion plus élevée.



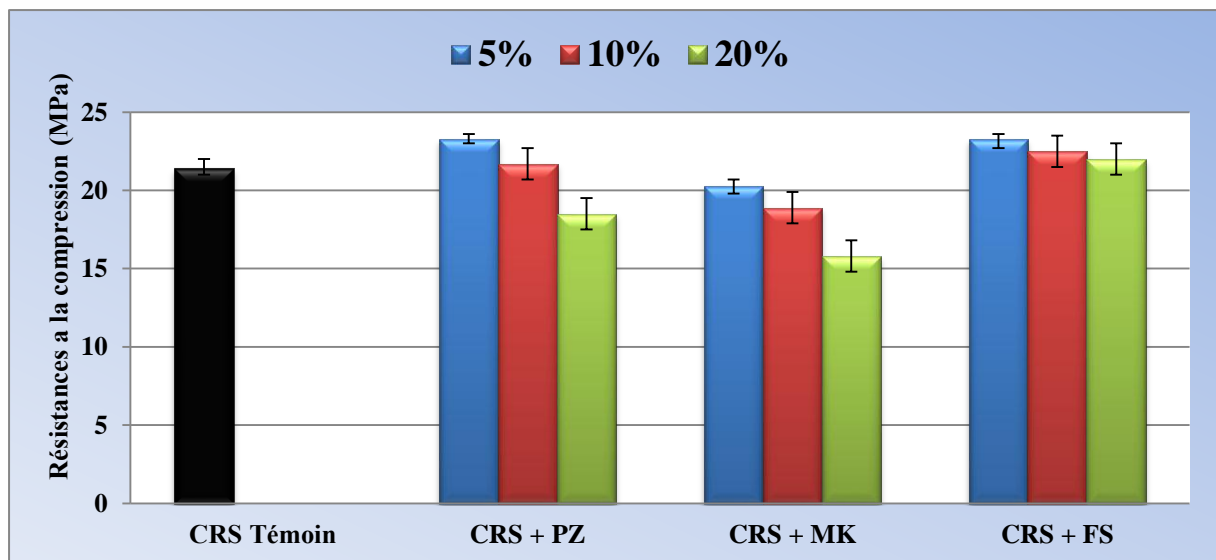
**Figure IV.5.** Evolution de l'expansion des ciments en fonction de leurs teneurs en ajouts.

### IV-3. Les essais sur mortiers :

#### IV-3-1. Influence des ajouts sur la résistance mécanique à la compression :

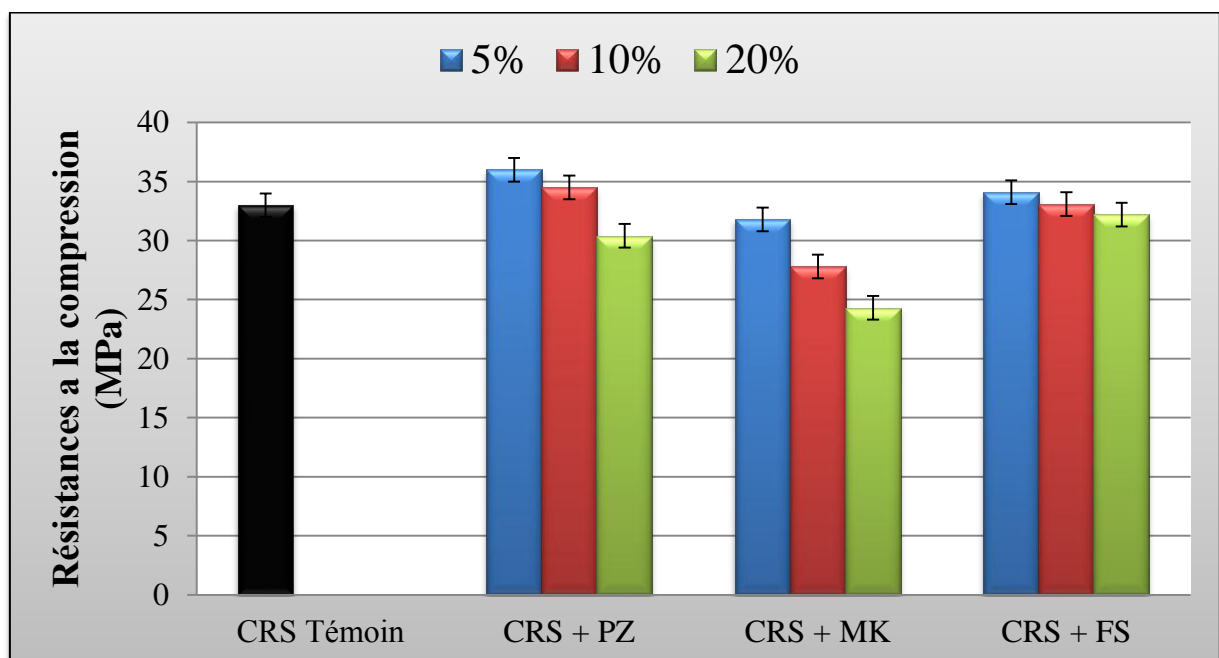
Les résultats des (figure IV-6, figure IV-7 et figure IV-8) montrent le développement des performances des mortiers contenant différents pourcentages des pouzzolanes par substitution (remplacement partiel du ciment par la pouzzolane) dans le ciment (effet chimique) en fonction des différents âges. On remarque que :

- La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.
- pour le mortier contenant 5% et 10% de pouzzolane augmentent régulièrement par 8,88% et 1,40% respectivement à celle du mortier de référence (mortier témoin sans ajouts). La même remarque dans la fumée de silice augmente par une variation égale à 2,80%, 5,14% et 8,88% d'incorporation de 5 jusqu'à 20% dans le ciment
- le mortier de métakaolin présente la plus basse valeur de la résistance à la compression que le mortier témoin dans tous âges de durcissement, par exemple à deux jours on voit une variation de 26,17% de l'addition de 5%.



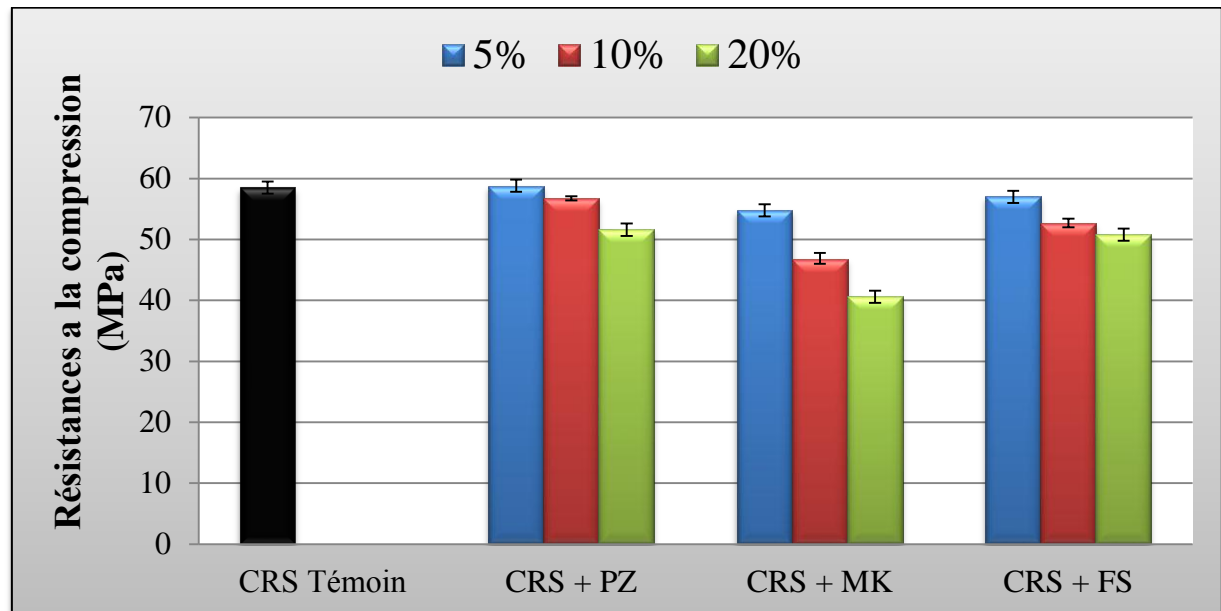
**Figure IV-6.** Résistances mécaniques des pâtes des ciments élaborés, après 2 jours de durcissement

Pour la résistance mécanique des mortiers à 7 jours (Figure IV.7), une nette augmentation est remarquée par l'addition de 5 et 10% de pouzzolane naturelle et de fumée de silice au ciment, qui dépasse la résistance du ciment témoin par une variation peut égale de 0,30 9,09% de résistance. Par contre le métakaolin et diminue par 26,36% que témoin et 32,5% par rapport le 5% de pouzzolane.



**Figure IV-7.** Résistances mécaniques des pâtes des ciments élaborés, après 7 jours de durcissement

La pouzzolane naturelle conserve son effet positif sur la résistance mécanique du ciment après 28 jours de durcissement notamment avec 5% d'addition par contre les autres pourcentages des ajouts. (Figure IV.8).



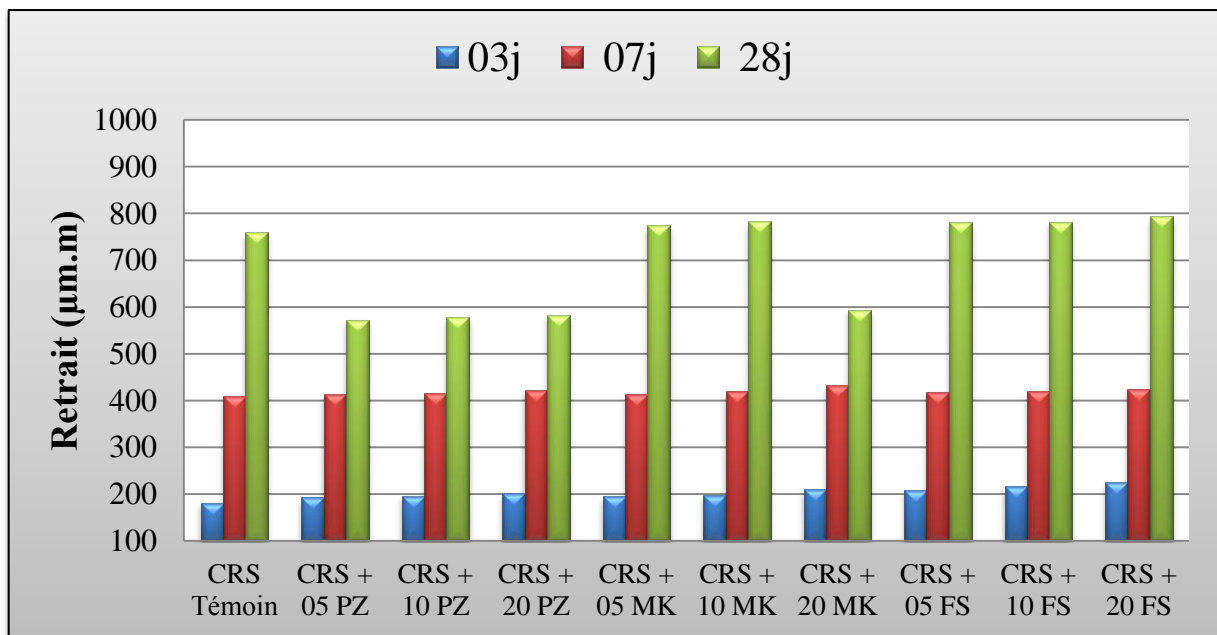
**Figure IV-8.** Résistances mécaniques des pâtes des ciments élaborés, après 28 jours de durcissement

Cette diminution de la résistance est considérable surtout au jeune âge et diminue lorsque le pourcentage de l'ajout augmente. Elle est due au fait que la réaction pouzzolanique n'est pas prédominante aux jeunes âges, ceci mène à une hydratation du minerai  $C_3S$  (silicate tricalcique) et  $C_2S$  (silicate bicalcique) moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances. Ces derniers sont les deux principaux minerais qui assurent le développement des résistances à court et à moyen terme [NAB 11], La réaction d'hydratation du ciment activé devient rapide et complète (formation du  $Ca(OH)_2$  libéré pendant l'hydratation du ciment). Cette réaction pouzzolanique participe à la formation d'un deuxième C-S-H supplémentaire. Par conséquent la faiblesse des résistances à court terme peut être compensée par activation du ciment (augmentation de la finesse du ciment activé par la pouzzolane).

#### IV-3-2. Influence des ajouts sur le retrait des mortiers normalisés:

La variation du retrait du mortier en fonction de pourcentages des ajouts. Sont présentées dans la (Figure IV-9) Ces résultats montrent une :

- augmentation du retrait avec l'accroissement du pourcentage des ajouts et l'âge du mortier.
- Pour le retrait des mortiers, une diminution remarquable à 28 jours par 24,61% de pouzzolane naturelle et 21,83% par l'addition de Métakaolin au ciment, par rapport au ciment témoin, par contre l'incorporation de 20% de FS a abouti à une augmentation de 4,5%. C'était la PZ qui a nécessité la plus faible augmentation du retrait par rapport au témoin.



**Figure IV-9.** Evolution du Retrait du mortier en fonction du pourcentage des ajouts

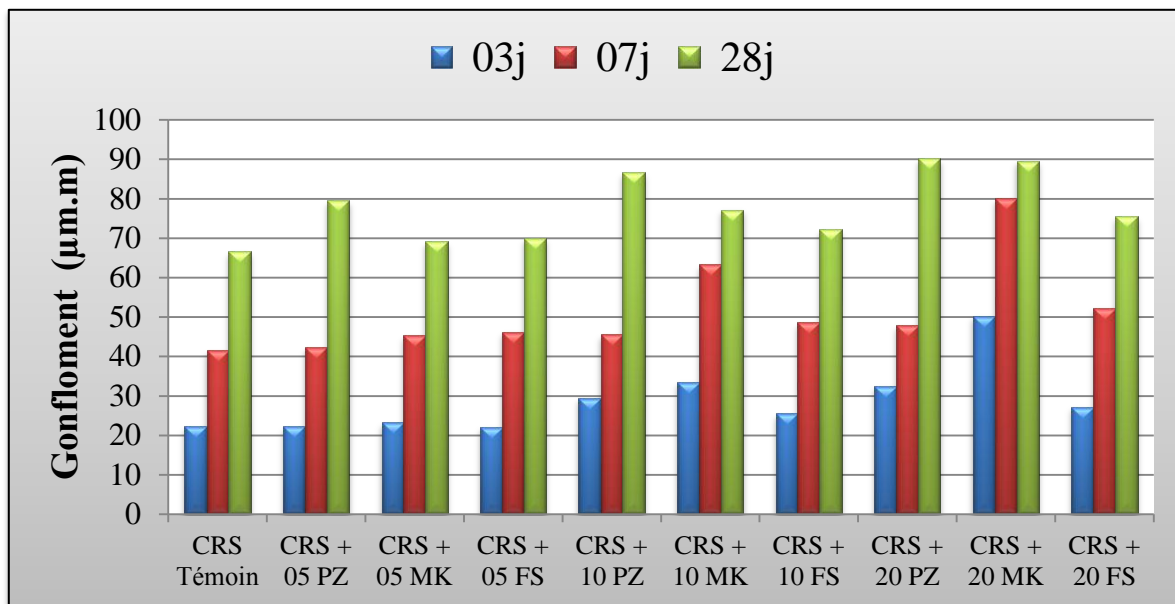
- Les mesures de retrait à 28 jours sont conformes à la norme NF P15-301 qui spécifie les retraits pour les ciments «CEM II» doivent être :
  - 800 µm/m pour la classe 32,5.
  - 1000 µm/m pour la classe 42,5.

Ceci est probablement à la l'absorption des ajouts : Le Retrait augmente avec l'âge du mortier, est due à la création d'un fin réseau de pores capillaires à l'intérieur de la pâte de ciment hydraté. La consommation d'eau pour l'hydratation du ciment provoque un assèchement se produisent des forces d'attractions qui provoque le retrait.

#### IV-3-3. Influence des ajouts sur le gonflement normalisés:

La variation du gonflement du mortier en fonction de pourcentages des ajouts. Sont présentées dans la (Figure IV-10), Ces résultats montrent une :

- Augmentation du gonflement avec l'accroissement du pourcentage des ajouts et avec l'âge du mortier. Comme on voit au 7 jours par 10% de métakaolin, le gonflement augment par 52,22% par rapport le témoin. Alors on dit que cette addition est préjudiciable au mortier, le même pour la pouzzolane.
- Le gonflement sur les éprouvettes contenant les différents pourcentages des ajouts est supérieur au gonflement de ciment témoin.



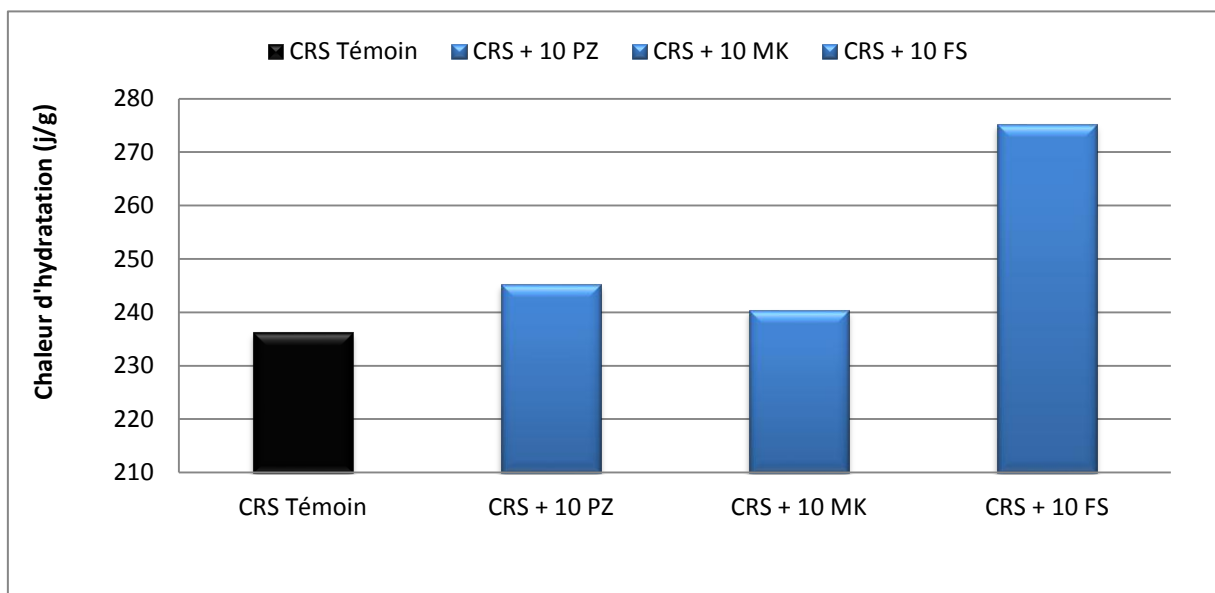
**Figure IV-10.** Evolution du Gonflement du mortier en fonction du pourcentage des ajouts

Ceci est probablement de dosage en chaux libre (CaO) et en magnésium (MgO). Il est à noter que le squelette solide de la pâte de ciment s'oppose au gonflement qui crée des contraintes de compression. Mais ce phénomène de gonflement dû à la formation des cristaux d'étrangéité.

#### IV-3-4. Influence des ajouts sur la chaleur d'hydratation:

La figure IV-11 présente les valeurs de chaleur d'hydratation dégagées par les mortiers normalisés confectionnés à base de ciment témoin et des ciments contenant 10 % de PZ, de FS et de MK après 41h. A partir de ces résultats on constate que la présence des ajouts dans le ciment a causé une augmentation de la chaleur d'hydratation. Il en résulte que le mortier témoin a dégagé la plus faible quantité de chaleur (236,25 j/g), contre 275,25 j/g, libérée par la variante contenant 10% de FS, soit une augmentation de 16,51%. Selon la norme NA 442, la valeur maximale de chaleur (271 j/g) n'a été dépassée que par cette variante (CRS +10 FS).

Ces résultats sont probablement dus à la teneur des ajouts (FS, PZ et MK) en CaO libre (et MgO libre), qui dégage 1150 j/g, lors de sa transformation en Portlandite [MAR 07], (Le ciment Portland ordinaire dégage entre 375 et 525 j/g lors de son hydratation). Pour cette période de 41 heures, il n'est pas lieu de parler d'une activité pouzzolanique de nos ajouts, car la réaction pouzzolanique, ne peut se manifester qu'après quelques jours [GHI 14]. Cela signifie que toute la chaleur dégagée est due, seulement, à la réaction d'hydratation du ciment. Toutes fois, et en plus de l'effet indésirable de la chaux libre qu'apporte ces ajouts, l'augmentation de la finesse et le manque en clinker peuvent être à l'origine d'une accélération d'hydratation notamment pour le CEM II-20%, ce qui a abouti à l'augmentation de sa chaleur d'hydratation. Des résultats similaires ont été rapportés par [FRI 00, TUR 05, GHI 14] en travaillant sur d'autres pouzzolanes naturelles et artificielles.



**Figure IV-11.** Evolution de chaleur d'hydratation du mortier en fonction du pourcentage des ajouts

## CONCLUSION :

Dans ce chapitre, on a déduit que l'addition naturelle comme la pouzzolane, fumes de silice et métakaolin un effet sur les caractéristiques physiques et chimiques du ciment (la surface spécifique, la consistance, le délai prise, stabilité et la chaleur d'hydratation). Quand des ajouts pouzzolaniques au ciment augmente la surface spécifique et la consistance ; Le temps de débute de prise augment et la résistance à la compression augmente avec l'âge de durcissements et diminue avec les pourcentages des ajouts pouzzolaniques.

# CONCLUSION

## CONCLUSION GENERALE

Les ciments aux ajouts minéraux sont de plus en plus utilisés pour la confection des matériaux cimentaires pour plusieurs raisons, soit écologiques, économiques pour améliorer certaines propriétés à l'état frais ou durci.

Ce travail expérimental étudie les avantages de substitution partielle du ciment par différents ajouts pouzzolaniques. Il consiste à préparer des mélanges de ciment en remplaçant un certain pourcentage de ciment [5%, 10% et 20%] par des ajouts pouzzolaniques de différentes natures (pouzzolane naturelle, fumée de silice et métakaolin), et de suivre à chaque fois l'effet de cette substitution.

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

- On peut dire que la masse volumique absolue diminue en fonction de l'augmentation de du pourcentage des ajouts pouzzolaniques dans le ciment.
- La surface spécifique de Blaine des ciments est en augmentation absolue avec l'incorporation des différents ajouts quelque soit leur pourcentage.
- L'augmentation de la demande en eau augmente avec le pourcentage de substitution quelque soit la pouzzolane utilisée.
- Le temps de début de prise augment et la fin de prise diminue proportionnellement avec l'augmentation de du pourcentage des ajouts pouzzolaniques dans le ciment.
- L'augmentation de l'expansion 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 et qui donnent généralement une expansion plus élevée
- La résistance à la compression augmente en fonction des différents âges et diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajouts.
- Le dégagement de la chaleur d'hydratation augmente proportionnellement avec l'augmentation de du pourcentage des ajouts pouzzolaniques dans le ciment.

# REFERENCE

## Références :

[ATE 06] Atelier Changement Climatique ; Les Enjeux Du Développement Durable Au Sein De L'industrie Du Ciment : Réduction Des Emissions De CO<sub>2</sub> Rapport Final Octobre 2005 - Février 2006.

[ANT 12] M. Antoni, J. Rossen, F. Martirena, K. Scrivener. «Cement Substitution By A Combination Of Métakaolin And Limestone». Cement And Concrete Research, V 42, 2012, P 1579–158.

[BES 10] Bessenouci « Impact Et Contribution Thermo Energétique Des Matériaux De Construction A Base Pouzzolaniques Dans L'habitat » Mémoire De Magister ; Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen ; Année Universitaire ,2010 .

[CMC 15] Cours En Ligne, « Matériaux De Construction » Agence Universitaire De La Laitier Sur Les Propriétés Mécaniques Et Physiques Des Mortier, 2015, P 7.

[CAM 10] Camille Magniont « Contribution A La Formulation Et A L Caractérisation D'un Eco matériau De Construction A Base D'agroressources » Thèse Doctorat De L'université De Toulouse, L'université Toulouse, 2010,P 32 , 33 .

[CHA 10] R. Chaid, R. Jauberthie Et A. Boukhaled « Effet De L'ajout Calcaire Sur La Durabilité Des Betons » Lebanese Science Journal, Vol. 11, No. 1, 2010.

[DAM 05] Damien Demailly ; Atelier Changement Climatique .Les Enjeux Du Développement Durable Au Sein De L'industrie Du Ciment : Réduction Des Emissions De CO<sub>2</sub> .Rapport Final ; Octobre 2005 - Février 2006 .

[DRE 98] Dreux .G & J. Festa «Nouveau Guide Du Béton Et De Ses Constituants». 8ème Edition. Eyrolles. Mai 1998.

[DOM 99] Puy de Dôme, France 11 octobre 1999 - Hélène Janin.

[FRI 00] M. Friasa, M.I. Sanchez De Rojasa, J. Cabrerab. «The Effect That The Pozzolanic Reaction Of Metakaolin Has On The Heat Evolution In Metakaolin-Cement Mortars». Cement And Concrete Research. V 30. 2000. P 209–216.

[JEA 07] Jean Fasta « Georges Dreux. Nouveau Guide Du Béton Et Ses Constructions » 8ème Edition, Eyrolles, 2007.

[JAC 05] P. Jacobs ; La Contribution De L'industrie Cimentière A La Réduction Des Emissions De CO<sub>2</sub>, 1050 Bruxelles: Comité De Coordination De La Politique Internationale De L'environnement (Www. Climat. Be - Chiffres 2005)

[HAB 08] G. Habert, N. Choupay, J.M. Montel, D. Guillaume, G. Escadeillas. «Effects Of The Secondary Minerals Of The Natural Pouzzolans On Their Pozzolanic Activity». Cement And Concrete Research, V 38, 2008, P 963–975.

[ISO 68] essai de pouzzolanicité pour le contrôle des ciments pouzzolaniques, Recommandation ISO R 863 Genève 1968

[GHE15] Melle Ghermaoui Amina « Effets De Certains Métaux Sur Les Propriétés Physico

Des Mortiers De Ciment De Béni Pouzzolane » Mémoire Master; Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, Année Universitaire 2015, P17.

**[GHI 14]** E. Ghiasvand, A. A. Ramezani pour, A. M. Ramezani pour. «Effect Of Grinding Method And Particle Size Distribution On The Properties Of Portland-Pozzolan Cement ». Construction And Building Materials, V 53, 2014, P 547–554.

**[GUI 04]** E. Guillon, « Durabilité Des Matériaux Cimentaires –Modélisation De L'influence Des Equilibres Physico-chimiques Sur La Microstructure Et Les Propriétés Mécaniques Résiduelles », Thèse De Doctorat, ENS Cachan/ Cnrs/ Université Paris 6, France-2004.

**[KIR 98]** Kiran Pokkuluri « Effect Of Admixtures, Chlorides, And Moisture On Dielectric Properties Of Portland Cement Concrete In The Low Microwave Frequency » Thesis Submitted To The Faculty Of The Virginia Polytechnic Institute And State University In Partial Fulfillment Of The Requirements For The Degree Of Master Of Science In Civil Engineering 1998

**[KIT 72]** Kittel, 1972 Introduction à la physique de l'état solide. Paris : Dunod, 350p.

**[LEA 70]** Lea. Fm.70 the Chemistry of Cement And Concrete. 3rd Ed. London: Arnold; 1970.

**[MOR 97]** Micheline Moranville. « Ciments Et Bétons Composition, Propriétés Et Utilisations », Article Bup ; N°790. Vol. 91 - Janvier 1997 P 125

**[MEA78]** MEATF, ministère de l'équipement et de l'aménagement du territoire de France, les Pouzzolanes et les basalts, bull n°92 Nov-Déc 1977 p 91-112, bull n°93 Fev 1978 p 61-69.

**[MEU 04]** Meukam P. « Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments », Thèse de doctorat, Université de Gergy-Pontoise, 2004.

**[MAS 76]** Massaza F, chimie des additions pouzzolaniques et ciments mélangés, II cémenta, 1976, 73, vol 1, p 3-38

**[MAR 07]** Marwen Bouasker. «Etude Numérique Et Expérimentale Du Retrait Endogène Au Très Jeune Age Des Pâtes De Ciment Avec Et Sans Inclusions». Thèse De Doctorat, Université De Nantes, 2007.

**[NAB 05]** Nabil Bouzoubaâ et Simon Foo « Utilisation De Cendres Volantes Et De Laitier Dans Le Béton : Guide Des Règles De L'art » Laboratoire De La Technologie Des Matériaux, Canada, 2005.

**[NAB 11]** Nabila Boualla. « Etude De L'influence De L'ajout De La Pouzzolane Sur Les Caractéristiques Physico- Chimiques Des Ciments » Mémoire de fin d'étude, Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudia. Licence 2011

**[NA 442]**

**[NF EN197-1]**

**[NF P 18-513]**

**[NF EN 196-5]**

**[NF P 15-467]**

**[NF P 15-467]**

**[EN 196-6]**

**[NF EN 196-1]**

**[NF EN 196-3]**

**[NF P15 – 433]**

**[NF EN 196-9]**

**[PIC 96]** H. PICHON, P. Gaudon, A. Benhassain, O. Eteradossi, «Caractérisation et quantification de la fraction réactive dans les pouzzolanes naturelles », Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 201- Jan-Fev 1996.

**[PIE 03]** Pierre Mounanga. «Étude Experimentale Du Comportement De Pates De Ciment Au Tres Jeune Age : Hydratation, Retraits, Proprietes Thermo Physiques». These De Doctorat, Universite De Nantes, 2003.

**[REG 75]** M. Regourd, H. Hornain, « Applications De La Microscopie Electronique A Balayage » Revue Des Matériaux De Construction, 693 : 73–87- 1975.

**[REG82]** Regourd M, « L'hydrations Du Ciment Portland » Revue Des Matériaux De Construction, Pesses De L'école, Nationale Des Pots Et Chasés P 193-221.1982

**[RAC 11]** Rackel SAN NICOLAS. «Approche Performantielle Des Bétons Avec Métakaolins Obtenus Par Calcination Flash». Thèse De Doctorat, Université De Toulouse, 2011.

**[SAB 10]** Sabri Safia., «Elaboration Et Détermination Des Propriétés D'un Nouveau Ciment Composé A Base De Pouzzolanes Artificielles » Mémoire De Magister. Année Universitaire 2010-2011

**[STE 04]** Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese Normand F. MacLeod et Richard J. McGrath « Dosage et contrôle des mélanges de béton » 7ème édition canadienne 2004.

**[SNE 16]**R. Snellings, O. Cizer, L. Horckmans, P.T. Durdziński, Ph. Dierckx, P. Nielsen, K. Van Balen, L. Vandewalle. «Properties And Pozzolanic Reactivity Of Flash Calcined Dredging Sediments». Applied Clay Science. V 129, 2016. P35–39.

[**TIR 15**]A. Tironi, C. C. Castellano, V. Bonavetti, M. A. Trezza. A. N. Scian, E. F. Irassar « Blended Cements Elaborated With Kaolinitic Calcined Clays ». Procedia Materials Science. V 8, 2015. P 211- 217

[**TAY 97**] Taylor H.F.W. «Cement Chemistry, 2nd Edition». Book, 1997, P 475.

[**TUR 05**] L. Turanli, B. Uzal, F. Bektas. « Effect Of Large Amounts Of Natural Pozzolan Addition On Properties Of Blended Cements». Cement And Concrete Research, V 35, 2005, P 1106–1111.

[**WAN 10**] Wang. G, Wang, Y, Gao. Z, (2010), Use Of Steele Slag As Granular Matériel: Volume Expansion Prédiction And Usability Criteria, Journal Of Hazardous Matériel, N°184, P.555-560.

سورة التوبة