



Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de Technologie

Département des Mines et Géologie

# *Memoire de Fin d'Etudes*

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Génie minier

Option : Valorisation des Ressources Minérales

*Présenté par*

*OULD MOHAMED ABDERRAOUF*

## Thème

***METHODES D'EVALUATION DE L'ACTIVITE***

***POUZZOLANIQUE SUR LES MATERIAUX CIMENTAIRES***

Soutenu le 03 /12/2020 devant le jury composé de:

Présidente: Mme. **BOUZIDI. N**

M.C.A U.A.M.B

Examineur : Mr. **BOUABDELLAH .S**

M.A.B U.A.M.B

Promoteur: Mr. **AYADEN . B**

M.A.A U.A.M.B

*Année Universitaire: 2019-2020*

Sommaire	
Dédicaces	
Remercîments	
Liste des figures	
Liste des Tableaux	
Liste des abréviations	
<b>Introduction générale</b> .....	<b>01</b>
<b>Chapitre.I.Processus de fabrication du ciment</b>	
I.1. INTRODUCTION.....	03
I.2 DEFINITION DU CIMENT .....	03
I.3. PROCEDES DE FABRICATION DU CIMENT .....	03
I.3.1 Procédé par voie sèche .....	04
I.2.1.1 Description du processus de fabrication du ciment par la voie sèche (cas de SCHS) .....	05
a. Concassage .....	05
b. Broyage et séchage .....	05
c. Homogénéisation .....	06
d. Lignes de cuisson .....	07
e. Refroidissement du clinker .....	09
f. Ligne de fabrication du ciment .....	11
I.3.2. Fabrication par voie humide .....	12
I.3.3. Procédé par voie semi sèche .....	13
I.3.4. Procédé par voie semi humide .....	13
I.4. CATEGORIES DES CIMENTS.....	14
I.4.1. Classification en fonction de leur résistance à la compression.....	14
I.4.2. Classification des ciments en fonction de leur composition.....	15
I.4.3. Autres types de ciments .....	15
I.4.3.1. Ciments résistants aux sulfates (C.R.S) .....	15
I.4.3.2. Ciments blancs.....	15
I.4.3.3. Ciments colorés .....	16
I.4.3.4. Ciments alumineux .....	16
I.4.3.5. Ciments à maçonner .....	16
I.5. UTILISATION DES CATEGORIES PRINCIPALES DU CIMENT .....	16
I.6. BETONS .....	17
I.6.1. Propriétés du béton .....	17
I.7. CONCLUSION .....	18
<b>Chapitre II : Généralités sur les matériaux pouzzolaniques : propriétés et applications</b>	
II.1 Généralités sur les matériaux pouzzolaniques .....	19
II.1.1. Historique .....	19
II.1.2. Classification des pouzzolanes .....	19
II.1.3. Théorie de l'activité pouzzolanique .....	20

II.1.3.1. Réactions pouzzolaniques.....	20
II.1.4. Les pouzzolanes naturelles.....	20
II.1.4.1. Mode de formation de la pouzzolane naturelle .....	20
II.1.4.3.1 Constituants actifs des pouzzolanes naturelles.....	21
II.1.4.3.2 Effets de la température sur les pouzzolanes naturelles .....	21
II.1.5. Caractéristiques de la pouzzolane .....	22
II.1.5.1. Couleur .....	22
II.1.5.2. Propriétés physiques.....	22
II.1.5.3. Compositions chimiques.....	22
II.1.5.4. Structure et texture des pouzzolanes.....	23
II.1.6 Utilisations .....	23
II.1.6.1. Pouzzolanes pour cimenterie .....	23
II.1.6.2. Pouzzolanes pour bétons légers .....	23
II.1.7. Rôle de la pouzzolane dans le ciment.....	24
II.1.7.1. Effet de La pouzzolane .....	24
II.2. Généralités sur les zéolithes .....	25
II.2.1. Types des zéolithes.....	25
II.2.1.1. Zéolithes naturelles .....	25
II.2.1. 2. Les zéolithes synthétiques .....	26
II.2.2. Structure des zéolithes .....	26
II.2.3. Zéolithes naturelles et le ciment.....	28
II.2.4. Activité pouzzolanique des zéolithes naturelles.....	29

### **Chapitre III. Analyse de l'activité pouzzolanique sur la qualité du béton**

III.1. Introduction.....	30
III.2 Méthodes d'évaluation des propriétés d'un béton .....	30
III.2.1. Fluorescence X.....	30
III.2.2. Analyse thermogravimétrique (ATG).....	30
III.2.3. Diffraction des rayons X (DRX).....	31
III.2.4. Essai de résistance à la compression.....	31
III.2.5. Essai de résistance à la flexion.....	31
III.2.6. Essais de consistance normale et de temps de prise sur pâtes de ciment.....	32
III.2.7. Essai de prise.....	32
III.2.8. Essai de chaux saturée .....	33

III.3. ANALYSE DES EXEMPLES POUR LES TROIS TYPES DE BETONS .....	33
III.3.1. EXEMPLE 1 : BETON ORDINAIRE.....	33
III.3.1.1 Composition d'un béton ordinaire .....	33
III.3.1.1.1 Granulats .....	33
III.3.1.1.2. Le Ciment.....	33
III.3.1.2. Gâchage du béton ordinaire .....	34
III.3.1.3. Conservation des éprouvettes .....	36
III.3.1.4. Mesures des propriétés physiques des bétons ordinaires.....	36
III.3.1.4.1. Masse volumique apparente.....	36
III.3.1.4.2. Mesures des propriétés thermiques.....	37
III.3.1.4.3. Conductivité thermique.....	37
III.3.1.4.4. Influence du dosage en ciment.....	38
III.3.1.4.5. Influence du rapport E/C.....	39
III.3.1.5. L'évolution des caractéristiques EN fonction de la température .....	39
III.3.2. EXEMPLE N°02 : BETON A BASE DU POUZZOLANE.....	40
III.3.2.1. Les matériaux utilisés .....	40
III.3.2.1.1. Ciment.....	40
III.3.2.1.2. Sable et Granulats .....	40
III.3.2.1.3. Pouzzolane naturelle .....	40
III.3.2.2. Préparation du béton à base de pouzzolane .....	41
III.3.2.3. Mesures des propriétés physiques des bétons à base de la pouzzolane .....	41
III.3.2.3.1. Variations dimensionnelles des bétons .....	41
III.3.2.3.2. Propriétés mécaniques .....	42
III.3.2.3.3. Les propriétés du béton à base de la pouzzolane .....	43
III.3.3. EXEMPLE N°03 : BETON A BASE DE LA ZEOLITHE .....	43
III.3.3.1. Les matériaux utilisés .....	43
III.3.3.1.1. Ciment utilisé.....	43
III.3.3.1.2. Sable utilisé.....	44
III.3.3.2. Évaluation de l'activité pouzzolanique des bétons à base de la zéolithe .....	44
III.3.3.2.1. Evaluation des zéolithes synthétisées par l'essai de chaux saturée .....	44
III.3.3.2.2. Etude par DRX des pâtes mélangées avec de la zéolithe.....	45
III.3.3.2.3. Résistance mécanique de ciment composé de zéolithe.....	46
III.3.3.3. Principales propriétés du béton à base de la zéolithe X.....	47
III.4. Conclusion.....	47

<b>Conclusion générale.....</b>	<b>49</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>50</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>52</b>
<b>Résumé.</b>	

# Remerciements

*Pour commencer, Louange à Dieu Seigneur tout puissant de m'avoir donné toute la capacité physique et morale pour mener à bien et faire aboutir ce travail*

*Il à exprimer toute notre gratitude, toute notre reconnaissance et tout mon remerciement à :*

*Mon encadreur Mr. **AYADEN** Brahim pour leur patience, leur disponibilité, pour leur écoute, leur conseil, ainsi que pour leur rigueur scientifique, qu'ils ont su me communiquer pour mener au mieux ce travail de recherche.*

*En deuxième lieu, je remercie les membres de jury, de m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail. Certes, leurs remarques et leurs conseils seront aussi utiles que nombreux, pour mes futurs travaux.*

*Je remercie vivement tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.*

## *Dédicaces :*

A tout **les membres de ma famille**

A vous tous qui vous m'avez aidé et encouragé par vos conseils et vous m'avez offert tout pour la réussite **ADJISSAMassinissa&BEN KHELIFA**  
**Hannane**

**LISTE DES FIGURES****CHAPITRE I**

<b>Figure. I.1 :</b> Les principaux constituants du ciment .....	04
<b>Figure. I.2 :</b> Image réel et schématisé d'un silo d'homogénéisation.....	07
<b>Figure. I.3 :</b> Ligne de fabrication de la crue .....	07
<b>Figure. I.4 :</b> Four rotatif long : ligne sèche .....	09
<b>Figure. I.5 :</b> Représentation schématisée d'une Ligne de cuisson .....	10
<b>Figure. I.6 :</b> Ligne de fabrication du ciment .....	12
<b>Figure. I.7 :</b> Schéma synoptique de la fabrication du ciment par voie sèche et humide. ...	14
<b>Figure I.8 :</b> Les constituants du ciment.....	17

**CHAPITRE II**

<b>Figure II.1.</b> Les réactions d'hydratation ciment et de la pouzzolane.....	26
<b>Figure II.2 :</b> Différentes zéolithes naturelles .....	28
<b>Figure II.3 :</b> Cage élémentaire cubo-octaédrique de cristal de zéolithe A ou X.....	30
<b>Figure II.4 :</b> Zéolithe de type A (LTA – Linde Type A).....	30
<b>Figure II.5 :</b> Zéolithe de type X ou Y (FAU – Faujasite). Les cubo-octaèdres sont assemblés par les faces hexagonales.....	31

**CHAPITRE III**

<b>Figure. III.1 :</b> Essai de traction par flexion .....	31
<b>Figure. III.2 :</b> Préparation des éprouvettes d'essai .....	36
<b>Figure. III.3 :</b> La conductivité thermique des bétons B1 et B2 en fonction de la température .....	38
<b>Figure. III.4 :</b> Influence de dosage en ciment sur la résistance à la compression .....	38
<b>Figure. III.5 :</b> Influence de rapport E/C sur la résistance à la compression ( $C=350\text{kg/m}^3$ ) .....	39
<b>Figure. III.6 :</b> Courbes d'expansions du béton témoin (Ba) et des bétons confectionnés avec les pouzzolanes .....	41
<b>Figure. III.7 :</b> Evolution des modules dynamiques dans le béton témoin (Ba) et les bétons confectionnés avec les pouzzolanes (Pz1 ; Pz2).....	42
<b>Figure. III.8:</b> Diffractogramme d'une zéolithe synthétisée à partir de la boue de forage .....	44
<b>Figure. III.9 :</b> Diffractogramme RX de la pâte « chaux- zéolithe X », après 7 et 28 jours d'hydratation.....	46
<b>Figure. III.10 :</b> Les résistances à la compression des trois types du béton étudié.....	48

## LISTE DES TABLEAUX

### CHAPITRE I

<b>Tableau I.1:</b> Classe de ciments normalisés en fonction de leurs résistances à la compression. ....	14
--	----

### CHAPITRE II

<b>Tableau II.01 :</b> Composition chimique moyenne de la pouzzolane .....	23
<b>Tableau II.02 :</b> Quelques propriétés de la pouzzolane naturelle .....	24

### CHAPITRE III

<b>Tableau III .1 :</b> Propriétés physiques du gravier et du sable .....	33
<b>Tableau III.2 :</b> Propriétés du ciment utilisé.....	34
<b>Tableau III.3 :</b> La Composition des bétons ordinaires B1 .....	35
<b>Tableau III.4 :</b> Masse volumique apparente et relative des bétons en fonction de la température .....	36
<b>Tableau III.5 :</b> Propriétés thermiques des bétons B1 en fonction de la température .....	37
<b>Tableau III.7:</b> Résultats de l'essai la résistance à la compression( $R_c$ ) pour les bétons étudiés .....	38
<b>Tableau III.8. :</b> Composition chimique de la pouzzolane naturelle en (%) .....	40
<b>Tableau III.9 :</b> Composition chimique (% massique) du ciment CEM I 42,5 N de Sig ...	43
<b>Tableau III.10.</b> Les pourcentages de CaO consommé par les zéolithes en se basant sur les résultats du volume de l'EDTA du dosage des ions calcium non fixés .....	45
<b>Tableau III.11 :</b> Résistance à la compression à 2, 7 et 28 jours du ciment composé de 10 et 20% de zéolithe X comparée au ciment témoin (CEM I-CRS-42,5 N).....	46
<b>Tableau III.12 :</b> La comparaison entre la résistance à la compression pour les trois types du béton.....	48

**SCHS** : Ciment à base de silicate de calcium hydraté.

**CEM I** : Ciment portland (dans la notation française CPA).

**CEM II** : Ciment portland composé (dans la notation française CPJ).

**CEM III** : Ciment de haut fourneau (dans la notation française CHF).

**CEM IV** : Ciment pouzzolanique (dans la notation française CPZ).

**CEM V** : Ciment au laitier et aux cendres (dans la notation française CLC).

**C.R.S** : Ciments résistants aux sulfates.

**XRF** : Analyse chimique.

**ZSM** : Les appellations commerciales des types de la Zéolite.

**LTA** : Linde type A.

**FTIR** : Analyse par infrarouge.

**ATD-TG** : Analyse thermique.

**DRX** : La diffraction des rayons X.

**NF EN** : Les normes Européennes pour la confection du béton.

**DEF** : Delayed ettringite formation.

**RSI** : Réaction sulfatique interne

**Ba** : Béton ordinaire

**Pz** : Béton à base de la pouzzolane

# ***INTRODUCTION GENERALE***

## **INTRODUCTION GENERALE**

L'industrie minière est une activité qui a pour objet l'extraction et le traitement de différents minerais qui représentent un pôle industriel et économique, elle joue un rôle important dans l'économie mondiale. L'Algérie riche en divers substances utiles dont la majorité n'est pas encore mise en valeur [1].

Le développement urbain d'un pays est apparu dans la qualité de ces immeubles et l'architecteur de ces villes et ces routes. Le ciment est un produit stratégique dans le génie civil pour la construction de structures en béton armé, c'est la matière la plus utilisée pour la réalisation de ces projets. La quantité et la qualité des différents types des ciments est dépend en grand partie des qualités et les types de la matière première utilisée [1 ; 2].

Aujourd'hui, l'Algérie a atteint la barre de 25 millions de tonnes de ciment par année. Plusieurs pays surtout ceux du tiers monde ont besoin du ciment, des bétons, des mortiers pour le développement de leurs infrastructures mais ils ne sont pas arrivés à satisfaire leurs besoins locaux et ils ont dans l'obligation d'importer de ciment pour les nouveaux faits de développement des infrastructures et moderniser leurs tels que : les routes, les ponts, les bâtiments, les ouvrages d'arts et d'autres et pour relancer leur développement durable [1 ; 2].

L'utilisation des additions minérales, comme substitutions au ciment, aussi bien sur les chantiers que dans les bétons prêts à l'emploi, est une pratique inconnue par les constructeurs de notre pays. C'est pourquoi, il nous apparu important d'étudier et d'évaluer l'influence de ces additions, comme substitutions au ciment, sur les propriétés du béton durci. Les pouzzolanessont des matériaux volcaniques, donc naturels, qui existent en quantités considérables en Algérie. Se sont des produits, bon marché, puisqu'ils ne nécessitent aucune énergie coûteuse et qui pouvait remplacer une partie non négligeable du ciment lors de la confection des bétons [3].

Plusieurs recherches ont été reconduites afin d'améliorer les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton en utilisant des différents produits minéraux comme ajouts. Des études antérieures ont montré que certaines additions pouzzolaniques étaient efficaces dans la prévention de la formation d'ettringite différée, ou de retarder le début de l'expansion par l'utilisation de la fumée de silice, [4]. Ces ajouts affectent significativement la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais.

Le but de ce travail est donc une revue bibliographique et analyse des taux de remplacement des matériaux pouzzolaniques qui engendrent un meilleur comportement rhéologique, et qui peuvent contribuer à produire un béton de très hautes performances [4].

Notre présent travail concerné par l'étude bibliographique des matériaux pouzzolaniques appliqués sur les matériaux cimentaires, est structuré en trois grands chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique qui présente surtout un aperçu sur les processus de fabrication de ciment.

Au second chapitre une présentation générale des matériaux pouzzolaniques avec leurs propriétés et leurs applications dans les matériaux cimentaires.

Le dernier chapitre est présentation des méthodes d'évaluation de l'action des matériaux pouzzolaniques sur les matériaux cimentaires, par une étude comparative entre trois types des bétons à base de la pozzolane, zéolitique et ordinaire.

Et on termine par une conclusion générale dont laquelle un ensemble de perspectives sont projetées.

# ***CHAPITRE I***

## ***Processus de fabrication du ciment***

## I.1. INTRODUCTION

La fabrication du ciment est un procédé complexe qui exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production, des contrôles rigoureux et continus de la qualité.

Le processus de fabrication du ciment peut se diviser en trois étapes : La première concerne la préparation de la farine crue, la deuxième étape consiste à fabriquer le clinker qui est le constituant principal du ciment, La troisième étape consiste à broyer finement ce clinker avec d'autres constituants pour obtenir un ciment avec des propriétés bien déterminées.

Ainsi, dans ce chapitre nous aborderons les différents procédés de fabrications du ciment, et leurs différentes classes de ciments tels que les ciments de structure de calcium hydraté.

## I.2 DEFINITION DU CIMENT

Le ciment est un liant hydraulique obtenu par cuisson à très haute température d'un mélange de calcaire et d'argile, suivi d'une phase de broyage. La plupart des ciments sont à base de clinker et d'ajouts. Il s'emploie le plus souvent sous forme de poudre : mélangé avec de l'eau, il fait prise et permet d'agglomérer entre eux des sables et des granulats (sable ou graviers), pour constituer de véritables roches artificielles, bétons ou mortiers [5].

## I.3. PROCEDES DE FABRICATION DU CIMENT

Le processus de production du ciment nécessite de l'énergie thermique pour la production de clinker, Chaque tonne de ciment libère 0,9 à 1,1 tonnes de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) un gaz à effet de serre important dans l'atmosphère, ce qui a un effet négatif sur le climat de la terre. D'autre part, d'importantes quantités de poussières de four à ciment sont générées lors de la production de clinker à haute température [6].

Il existe quatre (4) voies de fabrication du ciment qui se différencie au niveau des opérations de préparation des matières et de cuisson, mentionnées ci-dessus :

- La voie humide ;
- La voie semi-humide ;
- La voie semi-sèche ;
- La voie sèche (qui sera décrite en détail dans cette partie [6].

### I. 3.1. Procédé par voie sèche

Les ciments usuels sont fabriqués à partir d'un mélange de calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) environ de 80% et d'argile ( $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ ) environ de 20%. Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par apport de matériaux fournissant le complément d'oxydes requis.

Après avoir finement broyé, la poudre est transportée depuis le silo homogénéisateur jusqu'au four, soit par pompe, soit par aérogليسeur, à la sortie du four le clinker refroidi est broyé en l'ajoutant des proportions de gypse et du laitier de haut fourneau, c'est ainsi on aura le ciment portland composé



**Figure I.1** : Principaux constituants du ciment

Pour produire des ciments de qualités constantes, les matières premières doivent être très soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière dans le temps, mais si elle peut varier d'une cimenterie à l'autre en fonction de la qualité du gisement exploité, la composition du cru reste dans des proportions bien définies :

- Carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) : de 77 à 83 %.
- Silice ( $\text{SiO}_2$ ) : de 13 à 14%.
- Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) : de 2 à 4%.
- Oxyde ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) : de 1,5 à 3 %.

Dans ce qui suit, nous allons décrire le procédé par voie sèche utilisé pour la fabrication des ciments à base de silicate de calcium hydraté (SCHS) qui est un procédé

universel à la seule différence de l'ajout de quelques opérations en plus, en fonction des particularités des gisements des matières premières [6].

### **I.3.1.1 Description du processus de fabrication du ciment par voie sèche**

#### **A. Concassage**

Le concassage constitue la première étape de la comminution. Son objectif n'est pas la libération des minéraux, mais simplement la réduction de dimension afin de faciliter la manipulation ultérieure du minerai

#### **B. Broyage et séchage**

Le broyage est une opération qui consiste à réduire les particules à des dimensions très fines accompli par un mécanisme combiné d'abrasion, d'attrition et d'impact soit en milieu sec ou humide (pulpe), dans des tambours cylindriques d'acier appelés broyeurs (Mills) qui tournent dans la plupart des cas, autour de leur axe longitudinal. La fragmentation résulte de l'action (impact sur les particules) d'une charge broyante libre de se déplacer à l'intérieur du broyeur. La charge broyante peut être composée de boulets ou barres en acier, de roches dures ou du minerai même.

Le broyeur doit fonctionner dans des conditions optimales, qui dépendent du taux de chargement, de l'échelonnement et du diamètre des corps broyants, de la vitesse de rotation. La qualité du broyage dans les broyeurs est déterminée par l'énergie consommée, la finesse, le débit du broyeur et le type de mouvement des corps broyants.

#### **❖ Broyage des matières premières**

Les matières premières dosées doivent être finement broyées pour que les réactions chimiques et les échanges thermiques soient plus intenses au cours de leur cuisson dans le four ; les meilleurs clinkers sont obtenus à partir de la mouture plus fine.

La matière pré homogénéisée et stocké dans le hall est reprise puis envoyé dans le circuit de broyage du cru qui est constitué de deux broyeurs à boulets. Elle est ensuite très finement broyée en circuit fermé pour obtenir un mélange parfaitement homogène des constituants qui conditionne les réactions chimiques ultérieures. A la sortie des broyeurs, on obtient une poudre appelée farine dont la granulométrie est en général inférieure à 200µm ensuite, elle est expédiée vers la zone d'homogénéisation qui est l'ultime étape avant la cuisson

Le séchage de la crue s'effectue au parallèle avec le broyage des matières premières par les gaz chauds qui sortent du four.

Le broyage-séchage est très avantageux au point de vue calorifique, car les gaz chauds enveloppent complètement les particules fines, et leur transmettent rapidement leur chaleur. Le degré d'humidité de la matière et la température du gaz détermine la quantité de gaz chaud qu'il faut apporter à l'installation pour éliminer l'eau du cru, la vapeur d'eau produite est évacuée par des ventilateurs aspirateurs[8].

### C. Homogénéisation

En pratique, on s'aperçoit qu'une poudre est plus difficile à homogénéiser qu'une pâte. A qualité égale, l'homogénéisation d'une poudre demande des contrôles plus fréquents et des manipulations plus nombreuses. Elle exige généralement de disposer d'une importante batterie de silos : 04 pour l'homogénéisation discontinue et 02 silos pour l'homogénéisation continue.

L'homogénéisation confère à la matière crue une composition chimique stable. De cette stabilité dépend la régularité des propriétés du clinker [8]. Il existe plusieurs systèmes d'homogénéisation utilisés en cimenterie, parmi eux on distingue :

**Le système Fuller** : Le fond du silo est divisé en 4 parties (cadrans) et le soufflage s'opère de telle manière que l'un des cadrans est toujours soumis à une pression supérieure à celle des autres, le quadrant à haute pression (N°1) devient d'ailleurs le (N°2) au bout d'un certain temps et ainsi de suite. La poudre est soumise à un mouvement de rotation verticale, doublé d'un mouvement de rotation horizontal l'ensemble des deux procure une homogénéisation efficace.

#### C.1 Principe de fonctionnement Silos d'homogénéisation

La partie supérieure des silos est munie de filtres ; leur fond est constitué par un matériau poreux (feutre, céramique, métal fritté) au travers duquel l'air est envoyé.

L'air soufflé par les compresseurs forme une couche d'air tourbillonnaire sur le fond du silo principal puis est aiguillé par une vanne cyclique dans les 4 cadrans fictifs du silo. Cet air entre ensuite dans la chambre de mélange détendue qui, de sa part, est équipée d'un fond de fluidisation divisé en 4 cadrans.

L'amenée d'air spécifique, beaucoup plus importante dans la zone de fond de la chambre de mélange, provoque un échange interne des masses, c'est à dire une circulation des matières en phase de flux, verticale et horizontale.

Le plafond du silo est relié à un filtre à air d'exhaure. Des clapets d'égalisation de pression sur le toit de silos protègent le système contre la surpression et dépressions excessives [8].

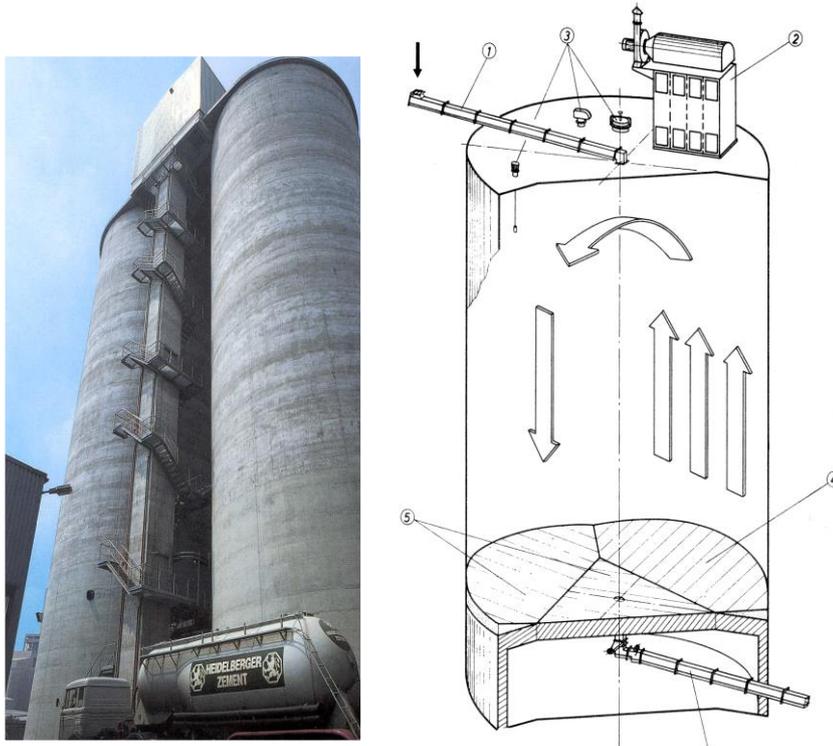


Figure I.2. : Schématique d'un silo d'homogénéisation[8].

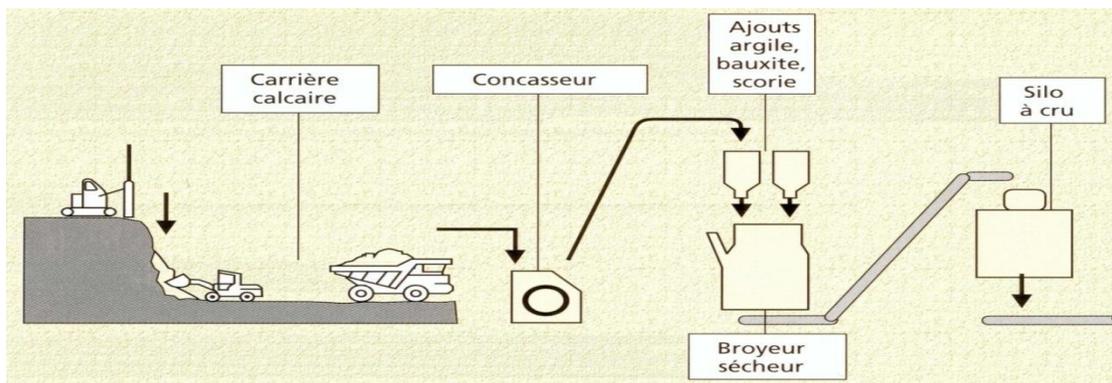


Figure I.3 : Procède de fabrication de ciment

## D. Lignes de cuisson

### D.1 Four échangeur thermique

Chacune des opérations impliquées dans le processus est importante et doit être correcte, faute de quoi le ciment risque de ne pas avoir la qualité exigée pour son emploi.

Cependant la cuisson est sans doute l'opération la plus sensible et la plus importante en termes de potentiel d'émissions, de qualité et de coût du produit. En effet, La farine crue (ou la pâte pour la voie humide) est introduite sous forme pulvérulente dans un préchauffeur à cyclone. Cet échangeur gaz/matière réalise la décarbonatation partielle de la farine crue (25% à 30%) qui doit être prête aux réactions du clinkérisation dans le four [9].

Le préchauffage de la farine se fait dans une série de cyclones disposés verticalement sur plusieurs étages appelée « tour d'échangeur thermique ».

Une opération de préchauffage commence par l'évaporation de l'eau contenue dans la farine et se poursuit par une décarbonatation partielle du calcaire. La farine crue homogénéisée introduite dans la partie supérieure de la tour se réchauffe au contact des gaz chaud provenant du four. D'étage en étage, elle arrive partiellement décarbonatée jusqu'à l'étage inférieur à une température d'environ 800°C.

#### **D.1.1 Four rotatif**

Le four rotatif est constitué d'un cylindre en acier de chaudière, animé d'une vitesse réglable lente (0.67 à 2 tr/mn), et présente une inclinaison de 3% dans le sens de l'écoulement de matière. Ce tube appelé aussi virole repose par l'intermédiaire de bandages, au nombre de trois, sur des galets, il est revêtu à l'intérieur de briques réfractaires qui protègent les tôles de température élevées (1850°C pour les gaz et 1450°C pour la matière). En amont, la matière pénètre à la température de 800°C. En aval les gaz à 1850°C sont injectés à l'aide de la tuyère. Il se produit un échange à contre-courant entre les gaz et la matière. Au fur et à mesure que la matière avance, elle se chauffe et se transforme.

Un groupe d'entraînement donne au four le mouvement de rotation nécessaire, a la fois au brassage de la matière et à la descente régulière de celle-ci de la zone amont (zone de décarbonatation) à la zone aval (zone de clinkérisation) A la sortie, les granules incandescents sont refroidis rapidement au contact de l'air injecté dans des tubes, ce qui permet de leur donner les structures cristallographiques optimales.

Au cours de la cuisson dans le four, les composants du mélange cru subissent des réactions chimiques successives, qui les transforment en clinker. Le four se divise ainsi en zones. Les limites entre ces différentes zones dépendent des températures et des réactions chimiques intervenant dans la matière. Cependant elles varient dans le temps et leurs longueurs dépendent de la qualité d'énergie thermique reçue des gaz et de la paroi. Néanmoins, on peut distinguer quatre zones principales relatives à ces mécanismes physico-chimiques, la zone de décarbonatation, la zone de transition, la zone de clinkérisation et la zone de refroidissement [9].



**Figure. I.4** : Four rotatif long : ligne sèche [5].

## **E. Refroidissement du clinker**

Le clinker quitte le four avec une température entre 1300 et 1400°C, il est nécessaire de le refroidir, d'une part, pour pouvoir le transporter d'autre part en vue du broyage. Par conséquent, le four est suivi par un refroidisseur dans lequel le clinker est refroidi dans un courant d'air froid. L'air de refroidissement est chauffé en mesure avec le refroidissement du clinker, et l'air chauffé est par la suite, utilisé comme air carburant à la combustion.

Il existe différents types de refroidisseurs : à grilles, à ballonnets et rotatifs. Dans le cas de SCHS, le clinker est refroidi comme dans la plupart des cimenteries actuelles par un refroidisseur à grilles.

### **E.1. Déroulement de l'opération**

Le clinker tombe sur la grille du refroidisseur, qui comprend des plaques de grilles au-dessus desquelles des sabots mobiles sont actionnés en avant et en arrière et poussent le clinker vers la sortie. La partie inférieure du refroidisseur est divisé en compartiments. Au travers ces grilles, de puissants ventilateurs vont souffler de l'air sous le clinker afin de le refroidir à une température d'environ 100°C (cette opération est appelée trempe).

À la sortie du refroidisseur et selon le modèle utilisé, un concasseur à marteau sert à concasser le clinker à des dimensions entre 0 et 40mm. Le clinker concassé sortant du refroidisseur est transporté par une bande métallique dans un autre transporteur à godets afin

d'être envoyé, soit directement à l'atelier de broyage clinker ou vers le hall de stockage clinker. La composition minéralogique du clinker obtenu après traitement thermique des matières crues introduites dans le four rotatif est en fonction de la composition du mélange introduit mais, aussi de la température à laquelle la cuisson est réalisée et des conditions de refroidissement (trempe à l'air).

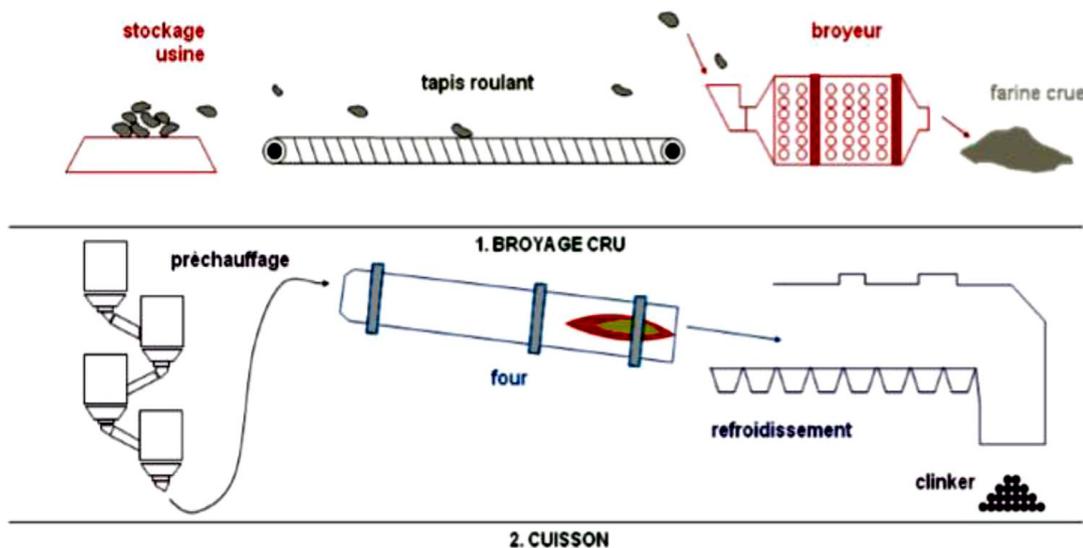
### E.2. Trempe du clinker

La nécessité d'un refroidissement rapide du clinker, ou trempe est pour des raisons de qualité du produit. La vitesse de refroidissement du clinker pendant la trempe doit être, au minimum, de 20 °C/min jusqu'à 1 200 °C et, ensuite, de 70 °C/min jusqu'à 500 °C.

Les observations et les mesures qui ont été faites conduisent à penser que grâce à la trempe :

- ✓ Le clinker sera plus facile à broyer ;
- ✓ La décomposition ou rétrogradation du  $C_3S$  (silicate tricalcique) sera empêchée.
- ✓ L'évolution du  $C_2S_a$  (silicate bicalcique a) en  $C_2S_g$  inerte sera réduite ;
- ✓ Les effets négatifs de  $MgO$  seront diminués ;
- ✓ La prise rapide des clinkers riches en  $C_3A$  (aluminat tricalcique) sera empêchée.

La ligne de cuisson est décrite dans la figure suivante :



**Figure I.5** : Broyage du cru et Cuisson du clinker [10].

## **F. Ligne de fabrication du ciment**

### **F.1. Broyage et ajouts**

Pour obtenir un ciment aux propriétés hydrauliques actives (un ciment qui réagira au contact de l'eau) le clinker doit être à son tour broyé très finement. Des broyeurs à boulets sont employés, et par choc ils font éclater les grains de clinker et amènent progressivement le ciment à l'état de fine farine, ne comportant que des grains inférieurs à 200 microns mètres ( $\mu\text{m}$ ).

L'alimentation des broyeurs est faite en continu. Des distributeurs automatiques assurent un dosage défini et constant des éléments qui doivent entrer dans la composition du ciment fini ; le clinker est mélangé avec le gypse (3 à 5%) indispensable à la régulation de prise du ciment, on obtient alors le ciment portland.

Les ciments avec "ajouts" sont obtenus par l'addition au clinker, lors de son broyage, d'éléments minéraux supplémentaires contenus par exemple : les laitiers de hauts fourneaux, Ainsi sont obtenues les différentes catégories de ciments qui permettront la réalisation d'ouvrage allant du plus courant au plus exigeant. Les proportions sont contrôlées par le laboratoire, les proportions moyennes pour fabriquer le ciment portland avec laitier sont les suivantes :

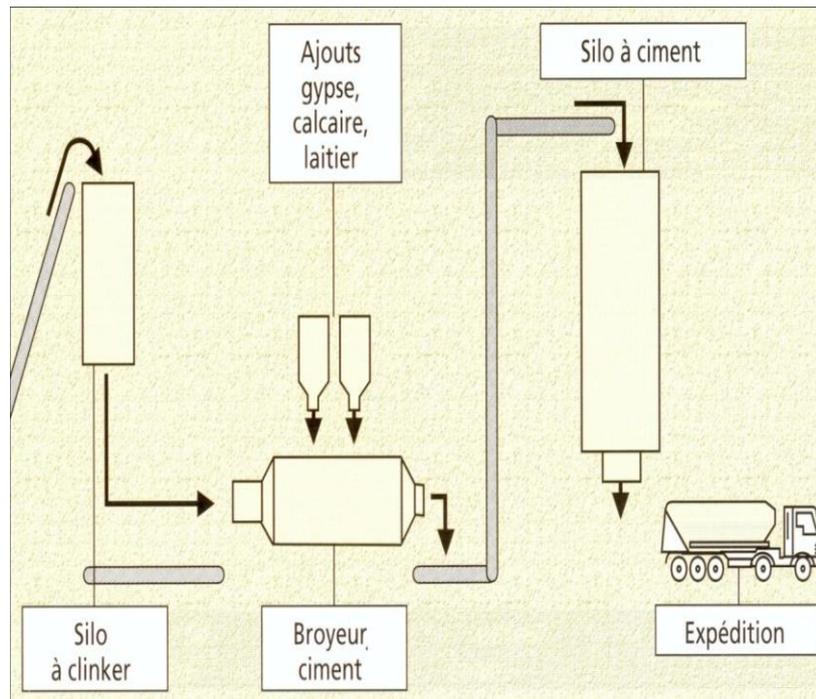
- ✓ 80% de clinker
- ✓ 15% de laitier
- ✓ 5% de gypse

A la suite du broyage, le ciment est transporté mécaniquement ou pneumatiquement vers les silos où il est stocké en attente d'expédition.

### **F.2. Homogénéisation et expédition du ciment**

Après le broyage, le ciment est sous sa forme définitive, tel que nous le connaissons sur les chantiers. Il est alors stocké dans des silos verticaux qu'il faut entretenir régulièrement. En effet au bout d'un certain temps, le ciment sèche dans les silos et s'entasse. Il faut donc assurer son homogénéisation continue afin que le ciment acquière les propriétés d'un fluide et ne se bloque plus, économisant des pertes qui peuvent être conséquentes. Le ciment est ensuite extrait de ces silos par un bec verseur et quitte l'usine en sacs ou en vrac.

La ligne de fabrication du ciment est schématisée dans la figure suivante :



**Figure I.6:** Ligne de fabrication du ciment [10].

### I.3.2. Fabrication par voie humide

Cette voie est utilisée depuis longtemps. C'est le procédé le plus ancien, le plus simple mais qui demande plus d'énergie.

Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont mélangés et broyés finement avec l'eau de façon, à constituer une pâte assez liquide (28 à 42% d'eau). On brasse énergiquement cette pâte dans de grands bassins de 8 à 10 m de diamètre, dans lesquels tourne un manège de herses. La pâte est ensuite stockée dans de grands bassins de plusieurs milliers de mètres cubes, où elle est continuellement malaxée et donc homogénéisée. Ce mélange est appelé le cru. Des analyses chimiques permettent de contrôler la composition de cette pâte, et d'apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson.

La pâte est ensuite envoyée au four tournant, dont la longueur peut atteindre 200 mètres. Les parois de la partie supérieure du four (zone de séchage - environ 20% de la longueur du four) sont garnies de chaînes marines afin d'augmenter les échanges caloriques entre la pâte et les parties chaudes du four. Le clinker à la sortie du four, passe dans des refroidisseurs où il subira une trempe, sa température passe de 1200°C environ à 100 °C.

De toute façon, quel que soit la méthode de fabrication, à la sortie du four, il faut broyer celui-ci très finement et très régulièrement avec environ 5% de gypse  $\text{CaSO}_4$  afin de « régulariser » la prise.

### **I.3.3. Procédé par voie semi sèche**

La poudre obtenue comme dans le cas du procédé par voie sèche que nous avons décrit ci-dessus, est agglomérée sous forme de boulettes de 10 à 20mm de diamètre à l'aide d'une assiette granularité de 2 à 4m de diamètre, inclinée de 50 degrés et recevant la poudre et de l'eau (12 à 14%). Ces boulettes passent dans un four constitué de deux parties : Une grille de décarbonatation et un four rotatif court.

### **I.3.4. Procédé par voie semi humide**

Dans le procédé par voie semi-humide, la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres-presses. Le gâteau de filtre-presse est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru [11].

Les bâtonnets obtenus sont introduits dans le four comprenant deux parties :

- Une grille métallique mobile dite de décarbonatation recevant des gaz chauds du four et où la matière subit un séchage et un début de décarbonatation ;
- Un four rotatif court (de 60 à 80 m de long).

## **I.4. CATEGORIES DES CIMENTS**

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

### **I.4.1. Classification en fonction de leur résistance à la compression**

Il existe trois classes principales et trois sous classes noté (R) associées au trois premières pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32,5, classe 42,5, classe 52,5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties désignés dans le tableau I.1.ci-après.

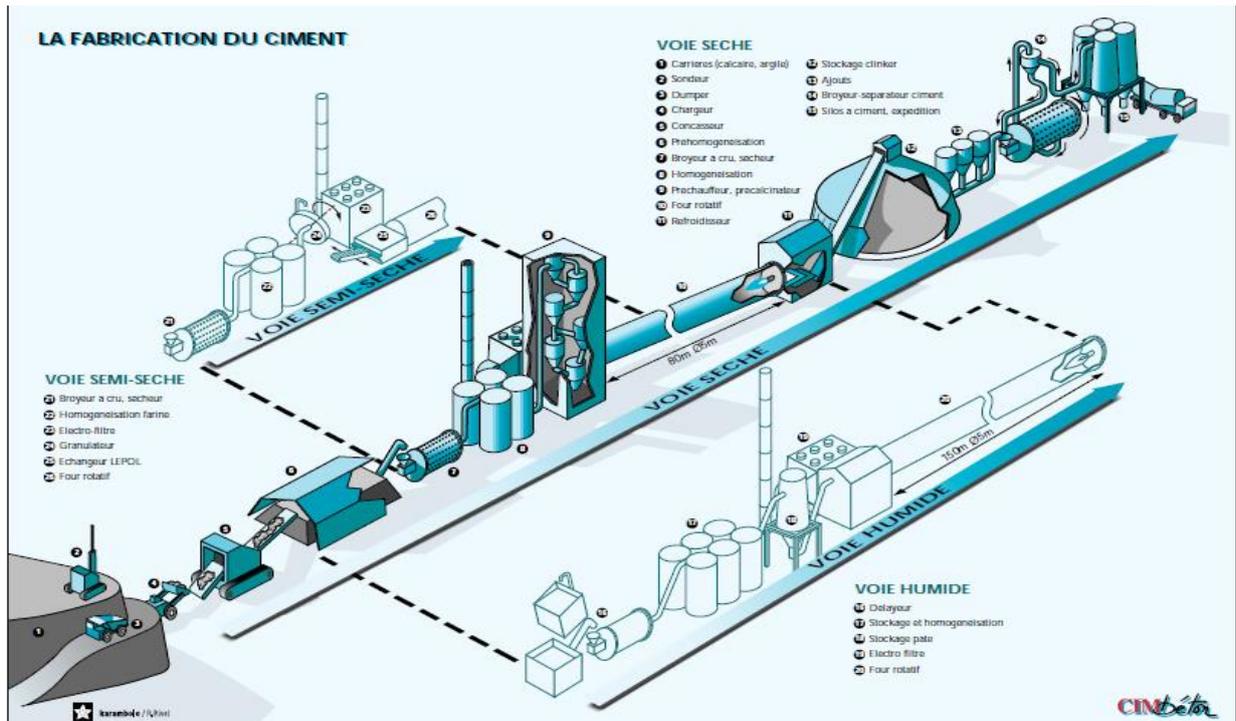


Figure I.7 : Schéma de la fabrication du ciment par voie sèche et voie humide [11]

Tableau I.1: Classification des ciments selon leurs résistances à la compression. [10]

Classe des ciments	Résistance à la compression (en MPa)		
	A 2 jours	A 28 jours	
		Minimum	Maximum
32.5	≤16	≤ 32.5	≤ 52.5
32.5 R	≤13.5	≤ 32.5	
42.5	≤12.5	≤ 42.5	≤ 62.5
42.5 R	≤ 20	≤ 42.5	
52.5	≤ 20	≤ 52.5	
52.5 R	≤ 30	≤ 52.5	

#### I.4.2. Classification des ciments en fonction de leur composition

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) :

- CEM I : Ciment portland (CPA - dans la notation française),
- CEM II : Ciment portland composé (CPJ),
- CEM III : Ciment de haut fourneau (CHF),
- CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ),
- CEM V : Ciment au laitier et aux cendres (CLC).
- Les ciments produits et commercialisés en Algérie sont essentiellement constitués de CPJ 32,5 et 42,5 types les plus demandés et CRS (Ciment résistant aux sulfates) largement utilisé dans les régions du sud.

La désignation des différents types du ciment en fonction de leur composition est présentée dans l'annexe N°01 [12].

### **I.4.3. Autres types de ciments [13]**

#### **I.4.3.1. Ciments résistants aux sulfates (C.R.S)**

Dans ce type de ciment, la proportion des composant principales du ciment sont telle que : la teneur en  $C_3S$  ne dépasse pas 50%, celle du  $C_3A$ , 5% et la somme de  $C_3A$  et  $C_4AF$  doit être supérieur à 22%.

#### **I.4.3.2. Ciments blancs**

Ces ciments sont obtenus à partir des matières premières contenant le moins possible d'oxydes colorants (oxyde de fer, de manganèse, de chrome, de titane et autre trace). Dans ce type de ciment, plus fragile que le gris car il doit rester immaculé, un refroidisseur rotatif est inséré entre le four rotatif et le refroidisseur a grilles. Il s'agit d'un cylindre légèrement incliné qui tourne sur lui-même et à l'intérieur duquel de l'eau est pulvérisée à l'aide de multiples buses. Bien que sa composition chimique soit légèrement différente, c'est grâce au refroidisseur rotatif que le ciment peut rester blanc : en effet, son rôle est de refroidir très rapidement le clinker à sa sortie du four, avant qu'il ne soit oxydé au contact de l'air.

#### **I.4.3.3. Ciments colorés**

Ces ciments sont obtenus par addition au clinker blanc des colorants minéraux résistants à la lumière et aux alcalis au cours du broyage. On peut citer le bleu outre de mer, l'oxyde de chrome, le noir de fumée, etc.

### **I.4.3.4. Ciments alumineux**

Le ciment alumineux est un liant hydraulique prompt obtenu par la cuisson d'un mélange de bauxite et chaux. Ces ciments sont fabriqués sans ajouts ou parfois en quantité très limitées, 2% au maximum pour améliorer certaines de leurs propriétés. Ils sont utilisés pour les travaux nécessitant l'obtention, dans un délai très court, des résistances mécaniques élevés (poutre et linteaux pour bâtiment, sols industriels, etc.).

### **I.4.3.5. Ciments à maçonner**

Ce type de ciment contient en proportions moindres les mêmes éléments actifs que le ciment portland artificiel (CPA). Ces propriétés et son comportement dans les milieux courants sont analogues à ce dernier, mais ces résistances sont moins élevées que celle du CPA normalisé.

## **I.5. UTILISATION DES CATEGORIES PRINCIPALES DU CIMENT**

❖ Le ciment portland CEM I (CPA) : Il est utilisé pour tous travaux en béton armé ou précontraint, coulés sur place ou en préfabriqués. Ils permettent un décoffrage et une mise en service rapide. Ce dernier représente 33% de la consommation totale du ciment.

❖ Le ciment portland composé CEM II (CPJ) : Son utilisation le plus fréquent est dans tous les travaux de maçonneries, le béton d'ouvrages courant en élévation, le dallage. Il représente 53% de la consommation totale du ciment.

❖ Le ciment des hauts-fourneaux CEM III (CHF) : Ils sont employés pour les ouvrages situés en milieux agressifs, travaux souterrains, ouvrage pour eau usée ou industrielle, travaux de mer (port, barrage etc.).

❖ Le ciment pouzzolanique CEM IV (CPZ) : Utilisations similaires à CEM III.

❖ Le ciment au laitier et aux cendres CEM V (CLC) : Utilisations similaires à CEM III [13].

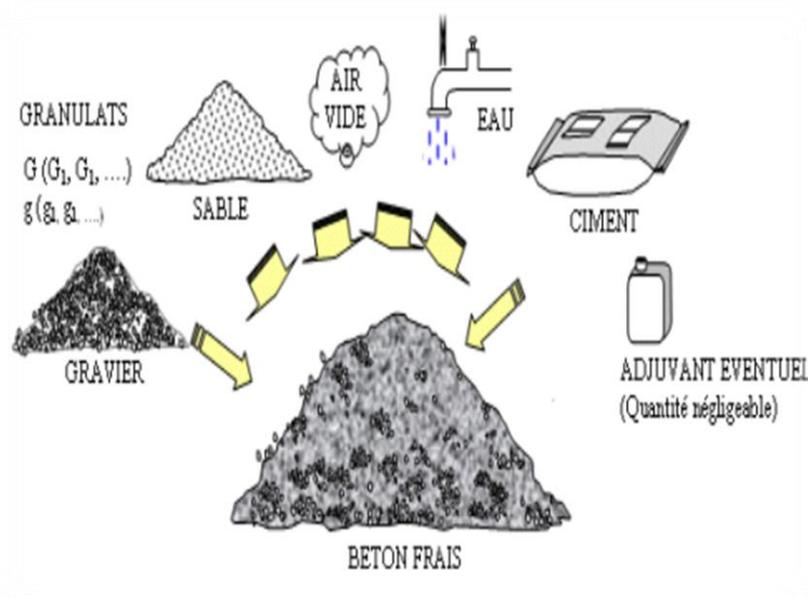
## **I.6. BETONS**

Le béton est un matériau composite aggloméré, constitué de granulats durs de diverses dimensions collés entre eux par un liant. Les composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants de 1 pour l'eau à plus de 3

pour le ciment (en  $t/m^3$ ). Si le type de liant utilisé n'est pas un ciment, on parle alors, soit de liant composé binaire, ternaire ou quaternaire.

En bref le béton est un mélange d'agrégat de (sable plus granulat) et de la pâte composée : de ciment, d'eau et d'adjuvant

- Pâte 30 à 40% ;
- Ciment portland 7% à 15% par volume ;
- Eau 14% à 21% par volume ;
- Agrégats 60% à 80% ;
- Gros granulats ;
- Granulats fins ;
- Adjuvants chimiques [14].



**Figure I.8 : Constituants du ciment [14].**

### I.6.1. Propriétés du béton

Le béton possède deux comportements : l'état frais et l'état durci. Parmi tous les constituants du béton, l'eau reste l'ingrédient qui peut nuire le plus même si c'est à grâce à l'eau que le béton peut être manipulé. Réduire son dosage permet :

- D'augmenter la résistance en compression et en flexion
- Réduire la perméabilité
- Réduire la contraction volumique (retrait de séchage)
- Moins de risques d'attaques d'agents agressifs extérieurs.

La réduction d'eau rend par contre le béton moins plastique. Avec l'incorporation des adjuvants chimiques, cela devient possible.

Le béton léger a été utilisé pour diverses applications dans de nombreux états. Cependant, de nombreuses recherches récentes ont porté sur le béton à haute performance, qui comprend du béton à haute résistance. Cette recherche de béton léger a été menée pour faire progresser parallèlement les normes de résistance et de maniabilité du béton de poids normal. De plus, de nouveaux développements dans la construction des plateformes pétrolières ont encore façonné le développement et la compréhension de ces mélanges de béton [15].

### **I.7. CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales étapes de production du ciment et une petite description sur le procédé de cuisson du clinker en générale. Dans le chapitre suivant, une revue sera présentée sur les différents matériaux pouzzolaniques utilisés dans les ciments et leurs produits ainsi que leurs effets et actions.

## ***CHAPITRE II***

# **Généralités sur les matériaux pouzzolaniques : Propriétés et applications**

### II.1 GENERALITES SUR LES MATERIAUX POUZZOLANIKES

**Définition :** Une pouzzolane est un matériau siliceux, alumineux ou ferrugineux, n'ayant aucune propriété liante en lui-même, mais qui, sous certains états de cristallinité et de structure peut réagir en présence de chaux et d'eau à température et pression normale pour donner un ciment [16].

La pouzzolane comme une roche naturelle, constituée par des scories volcaniques, essentiellement composée de silice ( $\text{SiO}_2$ ), d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et d'oxyde ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Leur couleur est généralement noire ou rouge selon le degré d'oxydation du fer. Elles n'ont pas des propriétés hydrauliques intrinsèques mais, en présence d'eau avec de l'hydroxyde de chaux libéré par le clinker au cours de son hydratation, elles forment aussi des hydrates stables et peu solubles dans l'eau.

Les constituants qui, par le même processus que les pouzzolanes, conduisent également à la formation d'hydrates stables sont réputés avoir des propriétés pouzzolanique. Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25 %), d'alumine et d'oxyde de fer [17].

#### II.1.1 Historique

Le terme pouzzolane tire son nom de « Pouzzoles », une localité près de Naples en Italie riche en terre volcanique. La pouzzolane naturelle produite par les projections volcaniques basaltiques est la majorité des matériaux naturels de faibles granulométries résultants des émissions explosives lors des éruptions volcaniques.

En 1938, au symposium de Stockholm, F.M. Léa a défini la pouzzolane comme étant une substance non hydraulique par elle mais contenant des constituants qui à température ordinaire et en présence d'eau peuvent se combiner avec de la chaux pour donner des composés peu solubles et doués des propriétés hydrauliques.

#### II.1.2 Classification des pouzzolanes

On distingue deux types de pouzzolanes :

- Les pouzzolanes naturelles qui proviennent pour la grande partie des roches volcaniques dans lesquelles le constituant amorphe est le verre produit lors de la fusion.

- Les pouzzolanes artificielles : les plus couramment employées sont les cendres volantes des centrales thermiques, les laitiers de haut fourneau, les bauxites et les argiles calcinées [16].

### II.1.3 Théorie de l'activité pouzzolanique

L'activité pouzzolanique ou pouzzolanité est l'aptitude de certains matériaux, dépourvus de propriétés hydrauliques propres, à fixer l'hydroxyde de calcium en présence d'eau pour donner des hydrates analogues de ceux du ciment Portland. Cette propriété se constate à des degrés variables dans les matériaux riches en silice libre non quartzeuse, quel que soit leur origine : matériaux naturels (gaize diatomite cendres volcaniques) ; matériaux artificiels (cendres volantes, fumées de silice, argiles calcinées, cendres de balles de riz).

L'action pouzzolanique se caractérise par deux aspects distincts :

- La quantité totale d'hydroxyde de calcium qu'une pouzzolane est capable de fixer.
- La rapidité de fixation d'hydroxyde de calcium par la pouzzolane [16].

#### II.1.3.1. Réactions pouzzolaniques

La réaction pouzzolanique est une réaction chimique entre la portlandite produite lors de l'hydratation du ciment et la silice ( $\text{SiO}_2$ ) ou l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) de la pouzzolane, ce qui permet de réduire la teneur en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et d'augmenter la résistance mécanique du mélange. En même temps que l'on mélange le clinker Portland et la pouzzolane, une petite réaction immédiate se produit et libère les ions de calcium et d'aluminium dans la solution. Par la suite, la pouzzolane réagit avec les hydroxydes alcalins puis avec l'hydroxyde de calcium libéré par le clinker Portland pour former alors les C-S-H et C-A-H [18].

### II.1.4 Pouzzolanes naturelles

#### II.1.4.1. Mode de formation de la pouzzolane naturelle

La pouzzolane appartient à la famille des roches éruptives. Les roches éruptives proviennent de la consolidation de magma émanant des profondeurs de l'écorce terrestre. On distingue deux types de roches éruptives : les roches plutoniques et les roches volcaniques.

Les roches volcaniques se divisent en deux groupes tels que les laves et les projections ; les pouzzolanes appartiennent à ce dernier groupe.

Les volcans caractérisés par des explosions violentes projettent des débris de tous les calibres. Les matériaux plus fins, constitués de cendres, peuvent être transportés par le vent et tomber en pluie, loin du centre d'émission, c'est le cas des pouzzolanes. Pour les projections volcaniques on distingue les bombes et blocs, les lapillis et les cendres. Au-dessous de 32 mm de diamètre, les projections sont dites lapillis, ce sont des fragments irréguliers, souvent bulleux et vésiculeux, constitués par une assez forte proportion de verre. Ceux des volcans d'Auvergne sont exploités sous le nom de pouzzolane [16].

### II.1.4.2. Constituants actifs des pouzzolanes naturelles

En général, la portion active des pouzzolanes est constituée par les phases amorphes ou vitreuses. L'activité pouzzolanique des phases amorphes ou vitreuses ne résulte pas directement de leur composition chimique, elle provient d'une altération des minéraux originaux subséquente à une exposition prolongée à l'eau contenant du CO<sub>2</sub> et à la vapeur d'eau surchauffée.

L'activité pouzzolanique des pouzzolanes naturelles peut être aussi due au caractère zéolithique de leurs constituants tels que l'analcime Na<sub>2</sub>O Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>4SiO<sub>2</sub>2H<sub>2</sub>O. Pour les tufs volcaniques dont la teneur en eau est élevée, l'activité pouzzolanique provient des composés zéolithiques, tandis que pour ceux dont la teneur en eau d'hydratation est faible et dont la solubilité dans les acides et bases est plus élevée, la phase vitreuse jouerait le rôle prédominant.

Pour les roches sédimentaires, l'activité pouzzolanique repose sur la teneur élevée en silice hydraté possédant une structure poreuse et une grande surface interne. Elle résulte en outre d'une certaine quantité de cristobalite et d'impuretés argileuses[16].

### II.1.4.3. Effets de la température sur les pouzzolanes naturelles

Par chauffage, il se produit d'abord un changement de la stabilité, par perte des constituants volatiles et formation d'une masse poreuse, puis un affaissement de la structure à plus haute température. La formation de la masse poreuse se produit dans le domaine de température compris entre 550°C et 980°C. L'activité pouzzolanique maximale est acquise entre 550°C et 870°C. La calcination entre 600 et 900°C de tufs volcaniques a pour effet en particulier de déshydrater les phases argileuses et zéolithiques. L'activité pouzzolanique maximale est atteinte par calcination entre 750°C et 980°C pour les roches sédimentaires.

## II.1.5 Caractéristiques de la pouzzolane

### II.1.5.1. Couleur

Elle varie du noir au rouge, marron à gris exceptionnellement jaune. La couleur des pouzzolanes est liée au rapport des pourcentages pondéraux des oxydes ferreux et ferriques ; soit :  $f = \text{FeO} / \text{Fe}_2\text{O}_3$  :

- Si  $f < 0,02$  ; la coloration est uniformément rouge pour les matériaux réduits à l'état de fines ;
- Si  $f$  est voisine 0,10, la coloration vire au brun ;
- Si  $f$  atteint 0,27 ; les produits sont donc de couleur noir [16].

### II.1.5.2. Propriétés physiques

Elle est d'aspect rugueux, caverneux, de porosité fermée, sa densité apparente varie de 0,8 à 1,3. La pouzzolane résiste au feu et au choc thermique. Elle fond vers 1140 °C [16].

### II.1.5.3. Propriétés chimiques

Les pouzzolanes sont des substances incapables de faire prise par elles-mêmes, mais communiquent à la chaux grasse les propriétés des ciments hydrauliques. L'addition de 1% d'alcalis améliore la capacité de fixation de la chaux par les pouzzolanes. Les pouzzolanes additionnées au ciment Portland avant broyage, améliorent les résistances à long terme, la résistance chimique et diminuent le retrait.

**Tableau II.01:** Composition chimique moyenne de la pouzzolane [16].

Éléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Teneurs maximale	40-42%	15-30%	10-15%

La présence synchronique de chaux et d'une base alcaline est susceptible d'activer formidablement le durcissement du produit gâché surtout si le mélange contient outre la pouzzolane, du laitier granulé. La pouzzolane qui a un pouvoir pouzzolanique très faible en présence de la chaux, peut acquérir un pouvoir pouzzolanique très élevé dès qu'elle est mise en présence de solution de soude ou de potasse [16].

#### II.1.5.4. Structure et texture des pouzzolanes

Les caractéristiques structurales de la pouzzolane peuvent être résumées par leur morphologie vacuolaire, et leur forme déchiquetée. Les vésicules de dimensions variables sont dues aux gaz emprisonnés dans la lave : plus celle-ci est fluide, moins elle est vacuolaire. Les explosions volcaniques façonnent la forme extérieure des grains provoquant des éjections des lambeaux des laves constitutifs des pouzzolanes naturelles à la suite du refroidissement. Cette structure donne aux granulats une porosité distincte, et un haut pouvoir d'isolation thermique [16].

D'autres propriétés de la pouzzolane naturelle sont présentées dans le tableau suivant :

**Tableau II.02** : Quelques propriétés de la pouzzolane naturelle [16].

(%) Porosité	pH	Densité	(%) Rétention en eau	(%) Air	Durabilité	Indices des vides
60-70	6,5 -7,00	0,8-1,3	19,0 -20	46	Très bonne	1,9-2,23

#### II.1.6 Utilisations

En général, les pouzzolanes ont deux principaux domaines d'utilisations :

##### II.1.6.1 Pouzzolanes pour cimenterie

Ces pouzzolanes rentrent dans la fabrication des ciments pouzzolaniques en leur apportant l'avantage de fixer d'une part la chaux libre insoluble et de l'empêcher de se dissoudre et d'autre part de réagir, après la prise du ciment, avec la portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) produite lors de l'hydratation des constituants anhydres du ciment[16].

##### II.1.6.2 Pouzzolanes pour bétons légers

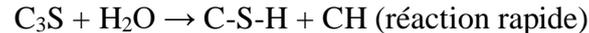
La pouzzolane est une roche naturelle constituée par des scories volcaniques ; elle possède une structure scoriacéou alvéolaire, elle est essentiellement composée de silice, d'alumine, et d'oxydes de fer. Elle doit renfermer moins de 0,5% de soufre et moins de 1% de  $\text{SO}_3$ . Les pouzzolanes granulats légers se prêtent bien à la confection des bétons légers. Les pouzzolanes en outre de ces deux principaux domaines d'emplois, ils possèdent bien d'autres [17].

### II.1.7 Rôle de la pouzzolane dans le ciment

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux à la suite de la réaction de l'hydratation du  $C_3S$  et  $C_2S$  (30% de la masse du ciment), cette chaux contribue peu à 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 qui augmente la perméabilité de lessivage [18].

Les pouzzolanes 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 (La réaction pouzzolanique forme le CSH stable dans l'eau.) [19].

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



Les réactions qui se déroulent sont :



#### II.1.7.1 Effets de la pouzzolane

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes :

- 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.

**b) 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 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 [20].

### II.2. GENERALITES SUR LES ZEOLITHES

Les zéolithes sont des aluminosilicates microporeux, en général parfaitement cristallisés. Sous l'effet de la chaleur, ces matériaux dégagent une quantité importante d'eau d'où l'origine grecque du nom « zéolithe = pierre qui bout »

Structurellement, les zéolithes se présentent comme des polymères cristallins basés sur un enchaînement tridimensionnel des tétraèdres  $TO_4$  ( $[SiO_4]^{4-}$  et  $[AlO_4]^{5-}$ ) reliés par leurs atomes d'oxygène. Cet arrangement résulte en une structure très aérée constituée d'un réseau régulier de canaux et de cages avec des ouvertures inférieures à  $10 \text{ \AA}$ . Les différents processus intervenant en adsorption, catalyse et échange d'ions se produisent dans ces pores dont la taille est très voisine de la taille des molécules organiques courantes [21].

#### II.2.1. Types des zéolithes

Les zéolithes peuvent être naturelles ou synthétiques. Plus de 150 types de zéolithe sont été synthétisées et 48 zéolithes naturelles sont connues.

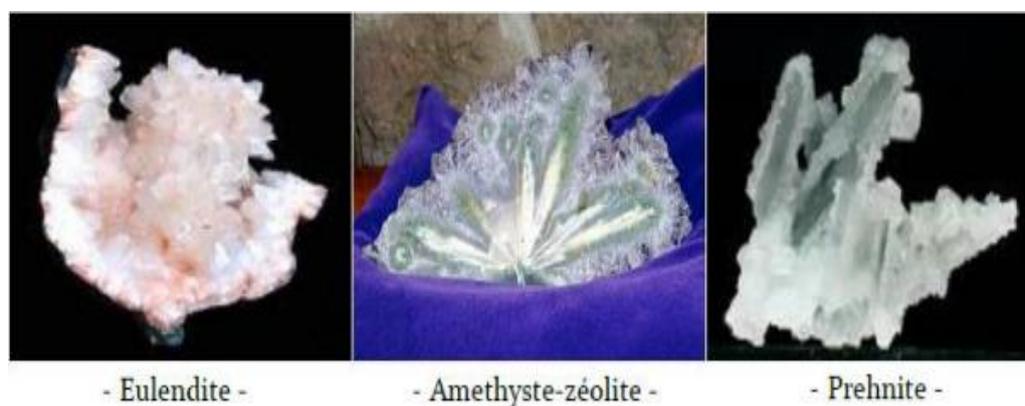
##### II.2.1. 1.Zéolithes naturelles

Le nom de zéolithe provient de la capacité de conserver les molécules d'eau bien au-delà de la température d'ébullition. Quand les molécules d'eau sont libérées des cages de

zéolithes sous l'effet de la température, le cristal semble bouillir. L'appellation zéolithe provient des mots Grecs Zein et Lithos qui signifient respectivement bouillir et pierre, soit pierre bouillante, zéolithes d'origine minérale composées de mordénite, chabazite, ériionite, clinoptilolite qu'on peut retrouver dans la nature [22].

### II.2.1. 2. Zéolithes synthétiques

Ces zéolithes sont synthétisées par des processus chimiques, ce qui donne un état plus uniforme et plus pur que les espèces naturelles en termes de structures de réseau, de taille des pores et de cages dans leurs cadres. Les principales matières premières utiles pour la synthèse de zéolithes synthétiques sont des produits chimiques purs à base de silice et d'alumine, ou aussi des métaux disponibles dans le sol ou des sous-produits industriels. Le type de zéolithe formé est fonction de la température, de la pression, de la concentration des solutions réactives, du pH, du processus d'activation et de la période de vieillissement et des teneurs en  $\text{SiO}_2$  et en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . D'après le rapport molaire Si / Al les zéolithes peuvent être classées comme "silicates bas", "zéolithes à silice intermédiaire" et "zéolithes à teneur élevée en silice", comme indiqué dans le tableau 1. Généralement, pour la zéolithe, ce rapport peut augmenter e (Si / Al) de 0,5 à l'infini et cette augmentation est liée à son tour à l'augmentation de nombreux autres paramètres comme la résistance à l'acide, la stabilité thermique et l'hydrophobicité, à l'exception de quelques paramètres (l'hydrophile, densité du site acide et concentration cationique) qui diminuent [23].

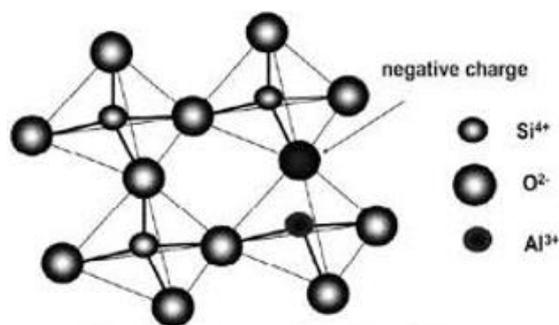


**Figure II.1:** Exemples de zéolithes naturelles

### II.2.2. Structure des zéolithes

Elles ont une structure ouverte, une structure métallique avec des canaux et des cavités de dimensions régulières, similaires à la taille de nombreuses molécules organiques et se

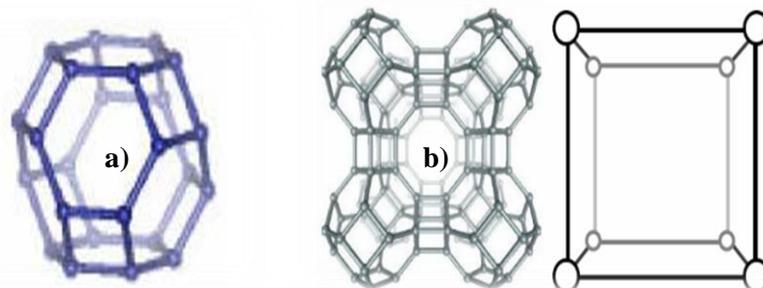
connectant à l'environnement externe. La porosité entièrement contrôlée et la présence de charges dues à la présence d'aluminium dans le cadre de ces matériaux présentent des propriétés particulières qui conduisent à des applications très diverses (échange d'ions, séparation, adsorption, catalyse). En raison de la forte demande de zéolithe stable à larges ouvertures de pores, sa synthèse pose un défi aux spécialistes de la synthèse hydrothermale [23].



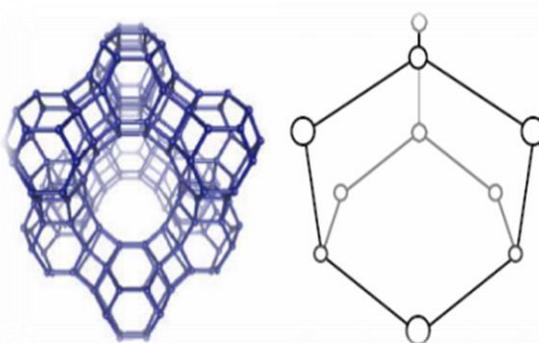
**Figure II.2 :** Les structures d'une zéolithe [23].

Les tétraèdres  $\text{SiO}_4$  et  $\text{AlO}_4$  sont reliés les uns aux autres dans les trois directions de l'espace par leurs sommets d'oxygène. Cette charpente tridimensionnelle s'organise en anneaux de 4, 5, 6, 8, 10, 12 ou 18 tétraèdres. Cet agencement laisse libre au sein de la structure un réseau très dense de canaux dont le diamètre est compris entre 3 et 13 Å selon la zéolithe, dans lesquels se trouvent l'eau et les cations de compensation.

Actuellement, plus de 150 types de structures élémentaires ont été trouvées dans la nature ou ont été synthétisées, classées selon un code à trois lettres par l'International Zeolite Association ; toutefois, seul un petit nombre d'entre elles (entre 5 et 10) ont pour le moment une application industrielle. Les zéolithes de type A (utilisées plutôt pour le séchage, la purification ou la séparation), X et Y (utilisées plutôt pour la purification et la catalyse) sont les matériaux les plus souvent utilisés en séparation et purification de gaz par adsorption. Il existe aussi des zéolithes de type B, L, N ..., auxquelles s'ajoutent toutes les appellations commerciales de type ZSM (utilisé principalement en catalyse), SSZ, ...



**Figure II.3 :** a) Cage élémentaire cubo–octaédrique de cristal de zéolithe A ou X, b) La Zéolithe de type A (LTA – Linde Type A).



**Figure II.4 :** Zéolithe de type X ou Y (FAU – Faujasite). Les cubo–octaèdres sont assemblés par les faces hexagonales.

### II.2.3. Zéolithes naturelles et le ciment

Aujourd'hui plus d'une cinquantaine de variétés de zéolites naturelles ont été découvertes et utilisées dans diverses industries, les plus courantes sont : l'analcime, le chabazite, le clinoptilolite, la mordénite et la philipsite. La production mondiale de ces matériaux est estimée à environ de 3-4 Méga tonnes par an destinée aux différents domaines d'application. Dans l'industrie de ciment, la zéolite naturelle est utilisée comme ajout pouzzolanique dans certaines régions du monde. En Chine, il est largement utilisé comme matière de mélange de ciment. Il a été rapporté par certains chercheurs que la quantité de zéolithe consommée à cette fin est équivalente à 30 millions de tonnes par an en chine. En Iran, la zéolite naturelle est abondamment rencontrée dans la nature et peut être facilement extraite et traitée pour une éventuelle utilisation dans les matériaux cimentaires à la place des pouzzolanes habituelles telles que les cendres volantes, la fumée de silice, le métakaolin de haute réactivité et le laitier qui sont rarement disponibles et demeurent relativement coûteux. La Turquie dispose plus de 50 milliards de tonnes de zéolithes naturelles, principalement sous forme de clinoptilolite dont

seulement 40 000 tonnes sont extraites et utilisées comme stabilisateur du sol et comme additifs alimentaires. Ceci a incité les chercheurs à l'utiliser dans le domaine de ciment [24].

### II.2.4. Activité pouzzolanique des zéolithes naturelles

Beaucoup de recherches ont examinée l'activité pouzzolanique des zéolithes naturelles en utilisant différentes analyses et tests de pouzzolanicité. Généralement, les composants réactifs des matériaux pouzzolaniques, tels que les cendres volantes, la fumée de silice et les pouzzolanes naturelles, sont vitreuses ou amorphes. Dans le cas des zéolithes naturelles, bien que sont des matériaux cristallins, peuvent agir comme des matériaux pouzzolaniques. Il a été constaté que la zéolite naturelle semble être un excellent additif des matériaux cimentaires. La grande quantité de  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  réactifs dans la zéolite se combine chimiquement avec l'hydroxyde de calcium, produit par l'hydratation du ciment, pour former d'autres gels tels que les silicates calciques hydratés (C-S-H) et les aluminates calciques hydratés (C-A-H). Il en résulte une amélioration de la microstructure de ciment durci, et donc une augmentation de la résistance mécanique et de la durabilité des matériaux cimentaires.

Les études menées sur l'activité pouzzolanique des pouzzolanes naturelles zéolithiques ont montrées que les tufs zéolithiques ont une excellente activité pouzzolanique, et ils sont plus réactifs que les cendres volantes en ce qui concerne la fixation de chaux. Dans une étude récente de Caputo sur l'activité pouzzolanique des zéolithes synthétiques, il a été montré que la zéolite moins siliceuse est plus réactive que celle siliceuse, tandis que la zéolite siliceuse à montrer une contribution plus élevée à la résistance du système à base de ciment [24].

## ***CHAPITRE III***

# **Analyse de l'activité pouzzolanique sur la qualité du béton**

### III.1. INTRODUCTION

Ce chapitre est 'une étude comparative entre les trois types des ciments cités dans cette études et leurs bétons on finira ce chapitre par une discrétion des résultats obtenus lors de cette comparaison et une conclusion de chapitre. Le chapitre sera organisé en quatre parties. Dans la première partie, nous testerons le développement de l'activité pouzzolanique des matériaux synthétisés par l'essai de chaux saturée.

### III.2 METHODES D'EVALUATION DES PROPRIETES D'UN BETON

Dans ce qui est suit, on va présenter l'ensemble des méthodes d'évaluation et de la caractérisation des déférent types des bétons étudiés, et pour sous faire on a choisi les méthodes d'analyses suivantes :

#### III.2.1. FluorescenceX

La spectrométrie de fluorescence X est une méthode d'analyse élémentaire, donc permet de déterminer les concentrations en éléments purs. Cependant, les éléments sont souvent présents sous la forme de composés (molécules, cristaux poly-atomiques) dans le matériau initial. Il peut donc être souhaitable de présenter des pourcentages de composés plutôt que d'éléments. On exprime par exemple souvent des concentrations en oxyde, en particulier en géochimie ou pour les ciments [1].

#### III.2.2. Diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est une méthode utilisée pour identifier la nature et la structure des matériaux. Cette méthode permet également de réaliser des analyses quantitatives ou semi-quantitatives [25].

#### III.2.3. Essai de résistance à la compression

La mesure de la résistance à la compression s'effectue sur une éprouvette de béton quelconque à l'aide d'un appareil d'écrasement. En enregistrant la force maximale indiquée dans le moniteur de la machine, on calcule la résistance à la compression comme suit :

$$R_c = F_c / A$$

Avec  $R_c$  : Résistance à la compression en [MPa],  $F_c$  est Force maximale de compression en [N] et  $A_{est}$  Surface de l'éprouvette en [mm<sup>2</sup>][25].

#### III.2.4. Essai de résistance à la flexion

Les essais de flexion sont réalisés sur l'appareil de flexion en plaçant l'éprouvette symétrique et centrée sur le plateau puis une charge continue est appliquée sur l'éprouvette jusqu'à la rupture et on effectue la lecture de la charge. La résistance à la flexion  $R_f$  (en N/mm<sup>2</sup>) est calculée au moyen de la formule :

$$R_f = 1,5 F_f l / b^3$$

Où :  $R_f$  : est la résistance en flexion, en newtons par millimètre carré ou en MPa.  $b$  : est le côté de la section carrée du prisme, en millimètres.  $F_f$  : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.  $l$  : est la distance entre les appuis, en millimètres [25].



Figure. III .1 : Essai mécanique de traction

#### III.2.5. Essais de consistance normale et de temps de prise sur pâtes de ciment

Ces essais consistent à suivre la transformation d'état d'un matériau visqueux, facile à travailler, à l'état durci (plus difficile voire impossible à travailler). En effet, pour chaque liant utilisé, il y'a une teneur en eau nécessaire qui donne à la pâte une consistance dite « normale ». La détermination de cette teneur en eau est en fait un antérieur à la mesure de la

prise. La quantité d'eau choisie est pesée directement dans la cuve du malaxeur. Puis on pèse 500 g de liant qui seront ajoutés à l'eau en un temps compris entre 5 et 10 s [25].

### III.2.6. Essai de prise

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée. L'appareil utilisé est l'appareil de Vicat équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre. Quand, sous l'effet d'une charge de 300 g, l'aiguille s'arrête à une distance  $d$  du fond du moule telle que  $d = 4 \text{ mm} \pm 1$  on dit que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début du malaxage, est appelé "temps de début de prise". Le "temps de fin de prise" est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm [25].

### III.2.7. Essai de chaux saturée

Le principe de l'essai consiste à déterminer la quantité de la chaux fixée sur le matériau testé dans des conditions précises, en évaluant la quantité d'hydroxyde de calcium résiduelle après un contact de  $n$  jours du matériau avec une solution de chaux [25].

## IV.3. ANALYSE DES EXEMPLES POUR LES TROIS TYPES DE BETONS

Dans ce qui suit, trois exemples de bétons sont présentés : béton ordinaire et bétons préparés par des ciments à base de la pouzzolane naturelle, et bétons à base de zéolithe qui ont été analysés pour la détermination de leurs caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques.

### III.3.1. EXEMPLE 1 : BETON ORDINAIRE

Cet exemple est une étude sur les bétons à haute performance réalisée par Albert. N,[27] sur le comportement des bétons ordinaire et à hautes performances soumis à haute température, dans le cadre de sa thèse doctorat en 2013 où il nous a montrés les principales méthodes d'évaluation de la qualité des bétons ordinaires :

#### IV.3.1.1 Composition d'un béton ordinaire

##### IV.3.1.1.1 Granulats

Les granulats utilisés sont de type silico-calcaire semi concassés. Ils sont constitués de 70-75% de silice, 20-25% de calcaire et 5% de feldspath. La classe granulaire du sable est 0/4 et celle des graviers est 6.3/20. Le tableau III .1 présente les propriétés des granulats

**Tableau III .1** : Propriétés physiques du gravier et du sable [26].

Caractéristique	Unité	Gravier	Sable
Masse volumique absolue	g/cm <sup>3</sup>	2,608	2,618
Masse volumique apparente	g/cm <sup>3</sup>	2,477	2,565
Masse volumique à n surface sec	g/cm <sup>3</sup>	2,527	2,585
Coefficient d'absorption d'eau	%	2,02	0,79
Coefficient de Los Angeles	%	23,6	-

### III.3.1.1.2.Ciment

Le ciment utilisé est du CEM I 52.5N CE CP2 selon la norme française NF produit par Calcia à Villiers au Bouin[27]. Les caractéristiques de ce ciment sont présentées dans le tableau III.2.

**Tableau III.2** : Propriétés du ciment utilisé [27].

Caractéristiques mécaniques et physiques									
Résistance à la Compression (MPa) à 28 jours		Retrait(µm/m) à 28jours		Début de Prise (nm)		Chaleur (j/h à41h)		Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	
61.3		580		165		351		3.13	
Composition élémentaire (%)									
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
20.23	4.29	2.35	0.25	0.02	63.67	3.88	2.80	0.69	0.14

### III.3.1.2. Gâchage du béton ordinaire

Ce teste a été réalisé à l'aide d'une centrale à béton d'une capacité de 300 litres avec une puissance de 5.5 kW. Un volume total de 250 litres de béton frais est nécessaire pour la confection d'une éprouvette. Tous les granulats sont mis dans des containers étanches pendant un jour avant l'utilisation. La teneur en eau du sable et du gravier est déterminée avant chaque coulage. Les matériaux sont versés dans la centrale dans l'ordre suivant : Graviers - Sable – Ciment. Un mélange à sec est fait durant 1-2 minutes. L'eau (pour la gâchée du béton B1.

Un test d'affaissement est fait pour s'assurer d'avoir un béton de classe de consistance S4(une classe de consistance des bétons référencés par la norme NF EN 206-1. Cette classe

est définie par les essais d'affaissement du béton au cône d'Abrams). Le remplissage des moules est fait en une couche pour des éprouvettes prismatiques 24x24x7cm, deux couches pour les éprouvettes cylindriques 15x30cm et trois couches pour l'éprouvette cylindrique 60x60cm. Chaque couche est compactée à la table vibrante pour les petites éprouvettes pendant 10 - 15 secondes, à l'aiguille vibrante pour les grandes éprouvettes pendant 1-2 minutes. Une fois remplis, les moules sont recouverts de sacs plastiques (figure III.4.).

Les bétons confectionnés sont : un béton ordinaire (indiqué B1) avec un rapport eau/ciment (E/C) de 0.67 ; La classe de consistance de la composition de béton est S4 avec un affaissement au cône de 16 à 21 cm selon la norme Européenne NF EN 206-1. Le tableau III.4 regroupe la composition des deux bétons [27].

**Tableau III.3:**Caractérisations des bétons ordinaires B1

<b>Dosage (kg/m<sup>3</sup>)</b>	B1
<b>Ciment (kg)</b>	327,5
<b>Eau (kg)</b>	218,6
<b>Gravier silico-calcaire (6.3-20) (kg)</b>	1068,6
<b>Sable silico-calcaire (0-4) (kg)</b>	630,4
<b>Super plastifiant (kg)</b>	0
<b>Masse volumique (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2272
<b>Rapport Eau/Ciment (E/C)</b>	0,67
<b>Rapport super plastifiant/ciment</b>	0,00
<b>Affaissement moyen (mm)</b>	190
<b>Résistance à la compression à 28 j (MPa)</b>	37-1



**Figure III.2.** Préparation des éprouvettes d'essai

### III.3.1.3. Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes 60x60 cm sont conservées dans leur moule recouvert de sac plastique pendant 75 jours. Elles sont ensuite démoulées quelques heures avant le traitement thermique. En ce qui concerne les petites éprouvettes destinées à la détermination des propriétés physiques, elles sont démoulées le lendemain de leur confection puis conservées dans des sacs plastiques étanches. Une période de cure d'au moins 28 jours est respectée pour les petites éprouvettes [27].

### III.3.1.4. Mesures des propriétés physiques des bétons ordinaires

#### III.3.4.1. Masse volumique apparente

Le tableau III.5. Regroupe les résultats de mesure de la masse volumique des différentes compositions de béton en fonction de la température. La masse volumique apparente est exprimée en pourcentage et est normalisée par rapport à la valeur initiale obtenue à la température de 80°C. Les évolutions de la masse volumique apparente et relative en fonction de la température sont montrées dans L'annexe N°2 sur les figures .1.et.2.

**Tableau III.4** : Masse volumique apparente et relative des bétons en fonction de température

Types du béton	Température [°C]	P moyenne [Kg/m <sup>3</sup> ]	Ecart-type	$\rho_Y/\rho_{80}$ [%]
<b>B1</b>	80	2112	8	100
	150	2098	9	99
	300	2062	12	98
	450	2036	10	96

La baisse de masse volumique apparente est attribuée à la perte de l'eau liée et à l'augmentation du volume du béton. En effet, le pré-séchage à 80°C pendant 28 jours a pour conséquence la perte quasi-totale de l'eau libre présente dans les bétons. La perte de masse supplémentaire aux températures supérieures (150, 300, 450°C) est causée par la perte de l'eau chimiquement liée et est donc en rapport avec le phénomène de déshydratation des bétons.

D'autre part, avec la montée en température, le béton subit diverses transformations physico-chimiques qui engendrent l'apparition de fortes fissurations.

#### III.3.1.4.2. Mesures des propriétés thermiques

Les résultats expérimentaux des propriétés thermiques sont présentés dans le tableau III.6. Les propriétés thermiques à 24°C sont mesurées sur des éprouvettes séchées dans l'étuve à 80°C puis refroidies jusqu'à la température ambiante. Les masses volumiques données dans le tableau III.6 sont utilisées pour déterminer la chaleur spécifique des bétons testés.

**Tableau III.5** : Propriétés thermiques des bétons B1 en fonction de la température

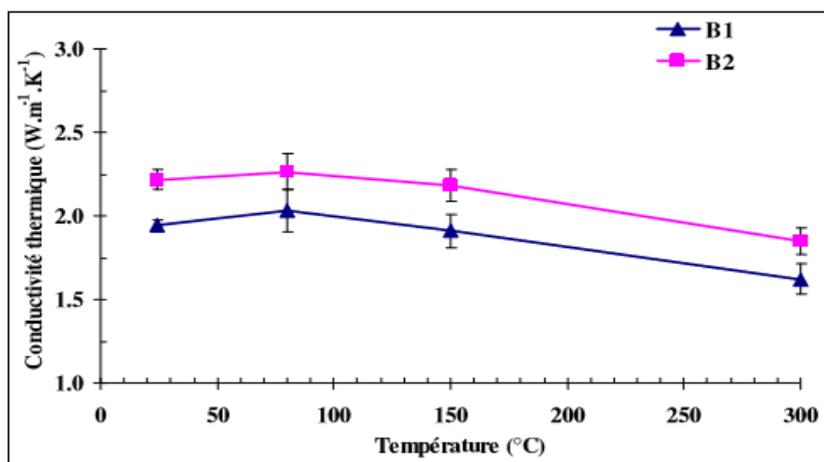
Type de béton	T (°C)	Les valeurs	Conductivité Thermique (W/m/K)	Diffusivité Thermique (mm <sup>2</sup> /s)	Chaleur Volumique (MJ/m <sup>3</sup> /K)	Chaleur Spécifique (J/kg/K)
<b>B1</b>	24	Moyenne	1,94	1,12	1,73	820
		Ecart-type	0,03	0,01	0,02	8
	80	Moyenne	2,03	1,00	2,04	966
		Ecart-type	0,13	0,08	0,06	28
	150	Moyenne	1,91	0,81	2,36	1125
		Ecart-type	0,10	0,05	0,13	61
	300	Moyenne	1,62	0,64	2,55	1235
		Ecart-type	0,09	0,06	0,19	94

### III.3.1.4.3. Conductivité thermique

L'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température est présentée sur la figure III.5. Une légère augmentation de la conductivité thermique est observée à la température 80°C. Ce faible gain de conductivité du béton peut être lié à l'eau piégée dans le squelette solide (pores et pâte de ciment). Ce phénomène est mis en évidence par le pré-séchage à l'étuve durant trois semaines à la température de 80°C. L'augmentation de la conductivité thermique de l'eau provoque une croissance de celle du béton.

Au-delà de la température 80°C, une baisse quasi-linéaire de la conductivité thermique est remarquée pour les bétons. Au cours du chauffage, le béton sèche en perdant de l'eau libre et de l'eau chimiquement liée (déshydratation des C-S-H).

L'incompatibilité de déformations entre la pâte et les granulats engendre des fissures qui limitent le transfert de chaleur d'où la baisse de la conductivité thermique.



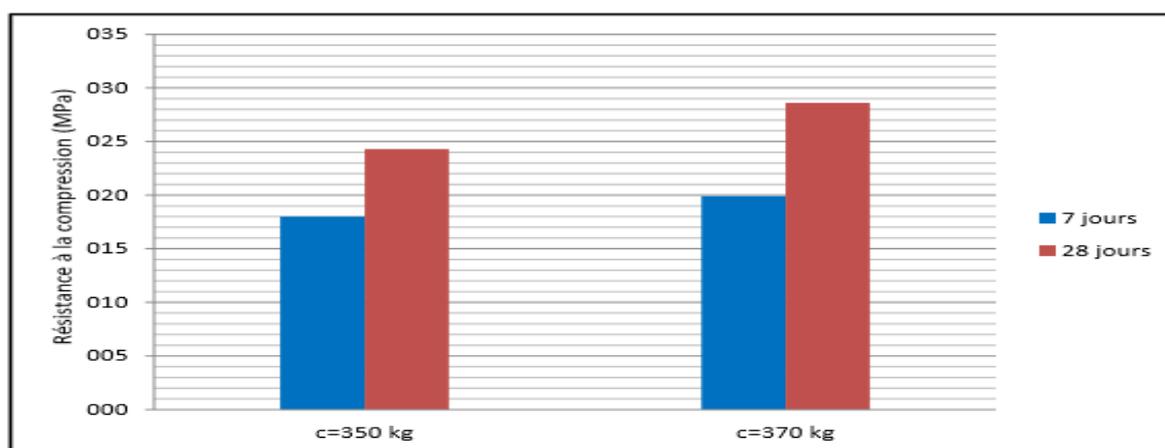
**Figure III.4:** la conductivité thermique des bétons B1 et B2 en fonction de la température

#### III.3.1.4.4. Influence du dosage en ciment

La variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en ciment et l'âge du béton sont présentées dans le tableau III.7 et la figure III.6.

**Tableau III.7:** Résultats de l'essai la résistance à la compression ( $R_c$ ) pour les bétons étudiés.

Bétons	Les résultats $R_c$ à 7 jours (MPa)					Les résultats $R_c$ à 28 jours (MPa)				
	$R_{ci}$			Moy	Ecar ttype	$R_{ci}$			Moy	Ecar ttype
<b>A</b>	17,42	17,91	18,66	18,00	0,63	21,15	25,88	25,88	24,30	2,73
<b>B</b>	19,66	19,66	20,40	19,90	0,43	27,62	29,86	28,36	28,61	1,14
<b>C</b>	21,65	23,14	23,64	22,81	1,04	36,33	37,32	36,08	36,57	0,66
<b>D</b>	27,87	31,85	25,88	28,53	3,04	49,76	51,01	51,50	50,76	0,09

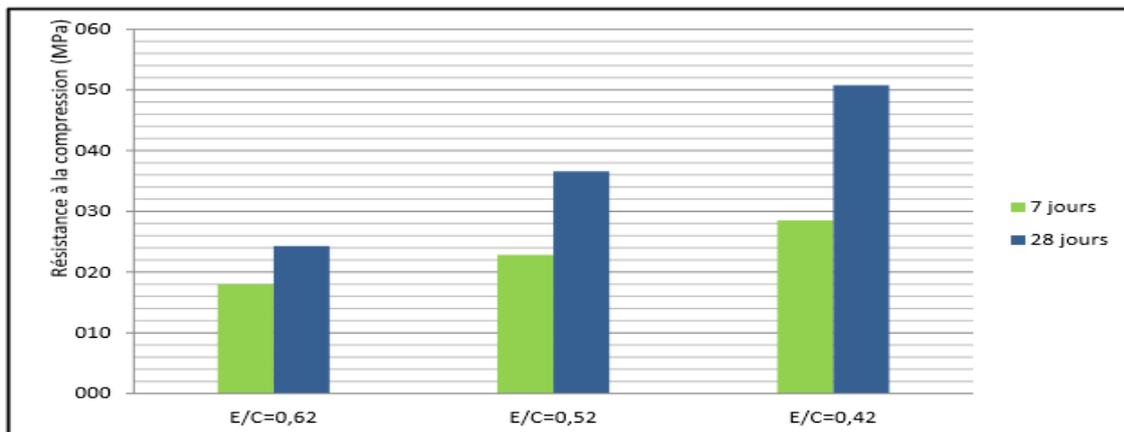


**Figure III.5:** Influence de dosage en ciment sur la résistance à la compression

Selon la figure III.6 qui montre l'effet du dosage en ciment sur la résistance à la compression, on observe une augmentation de la résistance avec l'âge, ainsi avec l'augmentation du dosage en ciment et cela à 7 comme à 28 jours. Effectivement, une augmentation de 17,74 % à 28 jours a été constatée entre le béton dosé à 370 kg/m<sup>3</sup> par rapport au béton dosé à 350 kg/m<sup>3</sup>[27].

#### III.3.1.4.5. Influence du rapport E/C

La variation de la résistance à la compression en fonction du rapport E/C et l'âge du béton sont présentées dans la figure III.5.



**Figure III.6.:** Influence de rapport E/C sur la résistance à la compression( $C=350\text{kg/m}^3$ )[27].

En tous cas, le dosage en ciment et le rapport E/C sont très souvent reliés aux propriétés mécaniques du béton et à sa durabilité. La formulation des bétons ordinaires doit impérativement passer par l'optimisation de ces paramètres.

#### III.3.1.5. L'évolution des caractéristiques en fonction de la température

L'évolution de ces caractéristiques avec la température dépend des phénomènes physico-chimiques au sein du béton (déshydratation du matériau, décomposition de l'ettringite, dés hydroxylation de la portlandite, apparition de fissures). L'évolution de ces caractéristiques en fonction de la température est décrite de la manière suivante :

- La masse volumique diminue avec la température,
- La perméabilité augmente avec la température,
- La conductivité thermique et la diffusivité thermique diminuent avec la température,
- La chaleur spécifique augmente avec la température.

Mais il reste à savoir que la résistance du béton ordinaire dépend de son dosage en matière nécessaire pour sa confection et la quantité du ciment est un facteur clé pour déterminer cette contrainte ainsi que le rapport E/C.

### III.3.2.EXEMPLE N°02 : BETON A BASE DU POUZZOLANE

Dans ce qui est suit on a discuté les bétons à base de la pouzzolane et pour se faire, on a combiné les résultats des deux articles universitaires publier par T. Langlet sous le thème Evaluation de la durabilité de mortiers pouzzolaniques exposés à une attaque chimique [28] et Yasser. A et al, 2015[29], qui a travaillé sur l'étude de l'influence des additions minérales sur la réaction sulfatique interne dans les matériaux cimentaires.

#### III.3.2.1. Matériaux utilisés

##### III.3.2.1.1. Ciment

Pour cette étude, un ciment Portland Ordinaire (CEM I 52,5R en respect avec la norme Européenne NF EN 197-1 [29]: définit et présente les spécifications de 27ciments courants, 7 ciments courants résistants aux sulfates, 3 ciments de haut fourneau, 2 ciments de haut fourneau à faible résistance à court terme résistants aux sulfates et de leurs constituants.) a été utilisé. Ce ciment est caractérisé par une finesse Blaine de 4400 cm<sup>2</sup>/g et une masse volumique absolue de 3,14 g/cm<sup>3</sup>. Les fractions massiques de ses principales phases, fournies par (Lafarge), sont : 60,6% de C3S ; 14,5% de C2S ; 8,1% de C3A ; 9,8 % de C4AF et 5,3% de gypse [30].

##### III.3.2.1.2. Sable et Granulats

Pour la fabrication des bétons, le sable normalisé siliceux de Leucate (0-2 mm) a été utilisé, conformément aux normes EN 196-1 et ISO 679, ce sable est non réactif vis-à-vis du phénomène d'alcali-réaction selon la norme NF-P 18-590. Pour la fabrication des bétons, nous avons choisi des granulats siliceux roulés provenant de la sablière Palvadeau (granulats NF, non alcali-réactifs), en utilisant les coupures granulaires 0 - 4mm (sable) et 4 - 12,5mm (gravillon)[31].

##### III.3.2.1.3. Pouzzolane naturelle

Les propriétés physiques de la pouzzolane utilisée sont comme suit : densité, 2,75 ; masse volumique apparente, 0,98 g/cm<sup>3</sup> ; Surface spécifique Blaine, 4255 (cm<sup>2</sup>/g). La composition chimique est présentée dans le Tableau III.8 [30].

**Tableau III.8. :** Composition chimique de la pouzzolane naturelle en (%) [31].

Composants	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	PAF
Teneurs	45,90	17,10	10,60	10,20	3,40	1,50	1,80	4,05	4,20

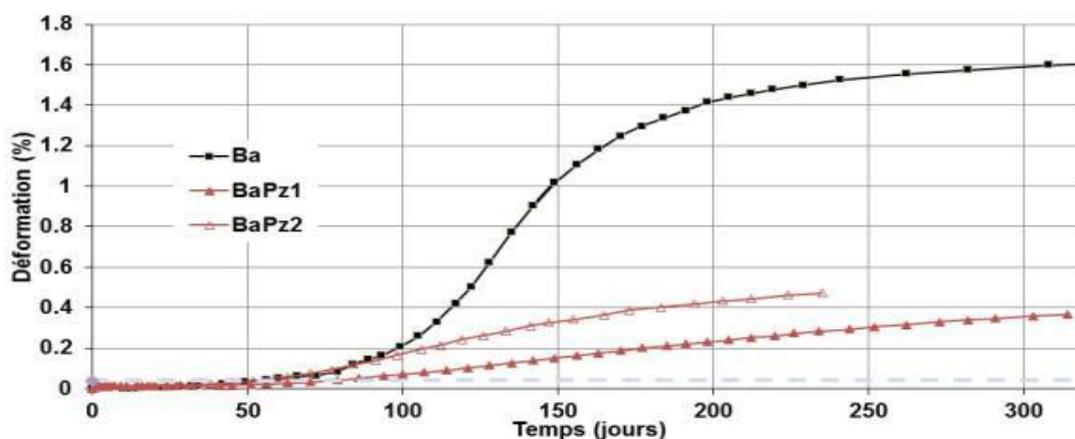
### III.3.2.2. Préparation du béton à base de pouzzolane

La formulation utilisée pour les bétons, comprend un dosage en ciment de  $424 \text{ kg/m}^3$  et un rapport E/C de 0,48. Ces valeurs sont représentatives de celles utilisées pour un béton d'ouvrage d'art. Nous avons utilisé des éprouvettes cylindriques ( $\phi=11\text{cm}$ ,  $h=22\text{cm}$ ) car ce type d'éprouvette montre un gonflement plus important que les éprouvettes prismatiques selon. Les additions en substitution du ciment ont été incorporées dans les bétons avec un taux de substitution massique de 15 % [31].

### III.3.2.3. Mesures des propriétés physiques des bétons à base de la pouzzolane

#### III.3.2.3.1. Variations dimensionnelles des bétons

La figure montre les courbes d'expansions du béton témoin (Ba) et des bétons confectionnés avec les additions de la pouzzolane (Pz) avec une proportion de 15%.

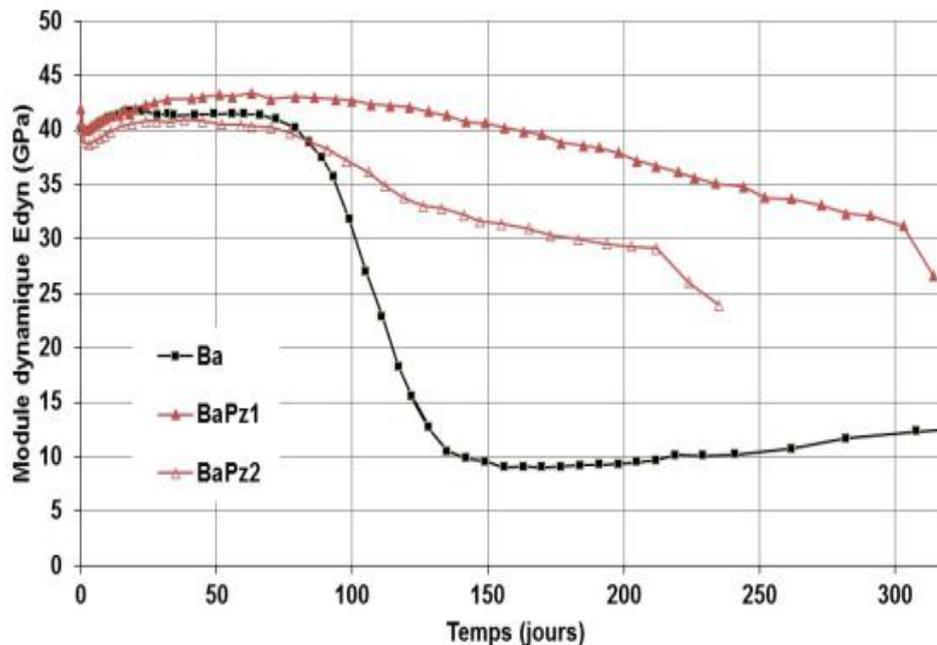


**Figure III.7.** Courbes d'expansions du béton témoin (Ba) et des bétons confectionnés avec les pouzzolanes [30].

D'après ces résultats, on constate premièrement que les éprouvettes de béton de référence (Ba) et les éprouvettes confectionnées avec 15 % de pouzzolane naturelle (Pz1 ; Pz2) montrent un gonflement important (supérieur à 0,04%) mesuré à 60 jours et on observe que l'évolution des expansions se développe sous la forme de sigmoïde. Une expansion de 0,04 % est un seuil arbitraire qui a déjà été utilisé par plusieurs littératures pour mettre en évidence une expansion significative. Ce taux de 15% de substitution n'est pas suffisant pour arrêter la réaction sulfatique interne (RSI) qui peut se développer dans les matériaux cimentaires, (RSI) ce qui est en accord avec les études de Nguyen et al. (NGU 13-1)

#### III.3.2.3.2. Propriétés mécaniques

La figure III. 9 montre l'évolution de module d'Young dynamique et elle compare les résistances à la compression des éprouvettes en béton et leur porosité accessible à l'eau mesuré à différents stade expansions due à la formation d'ettringite différée des bétons de référence (Ba) et des différents bétons confectionnés avec additions (Pz ; Mk ; Cv), une autre figure est présentée dans l'annexe N°3 nous montre l'évolution de la résistance à la compression entres les bétons étudiés.



**Figure III.8.** Evolution des modules dynamiques dans le béton témoin (Ba) et les bétons confectionnés avec les pouzzolanes (Pz1 ; Pz2)[31].

On observe que la résistance mécanique et le module augmentent lentement dans un premier temps (effets du développement normal de l'hydratation), puis le module diminue légèrement. Ensuite, dans la phase d'accélération des expansions, on observe une chute brutale du module dynamique. Cette chute est traduite par une diminution des caractéristiques mécaniques dues à l'endommagement du béton (fissuration). Enfin, on note une nouvelle augmentation progressive du module dynamique. La porosité augmente progressivement au cours du temps pour se stabiliser vers la fin aux alentours de 16% pour Ba [31].

### III.3.2.3.3. Les propriétés du béton à base de la pouzzolane

D'après les résultats des analyses effectuées il est constaté que la maniabilité des pâtes pouzzolaniques diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la pouzzolane naturelle. En outre les pâtes pouzzolaniques ont besoin plus d'eau pour

l'obtention d'une consistance normale, influent sur le processus d'hydratation du ciment et augmentent les temps de début et de fin de prise proportionnellement aux pourcentages de la pouzzolane. Cependant des essais complémentaires sont nécessaires pour confirmer et développer ces résultats : augmentation de la durée de cure des bétons pouzzolaniques, puisque la pouzzolane réagit à long terme, et utilisation des adjuvants fluidifiants pour réduire la demande en eau [31].

### III.3.3. EXEMPLE N°03 : BETON A BASE DE LA ZEOLITHE

Cet exemple est une étude sur les bétons à base de la zéolithe, se travail est présenté lors d'un travail de mémoire de fin d'étude qui est réalisé par Terbeche Ouafaa, sur l'élaboration de matériaux zéolithiques à partir de déchets industriels pour une utilisation comme pouzzolane active dans un ciment ternaire, dans son mémoire pour l'obtention du diplôme de magister [19].

#### III.3.3.1. Matériaux utilisés

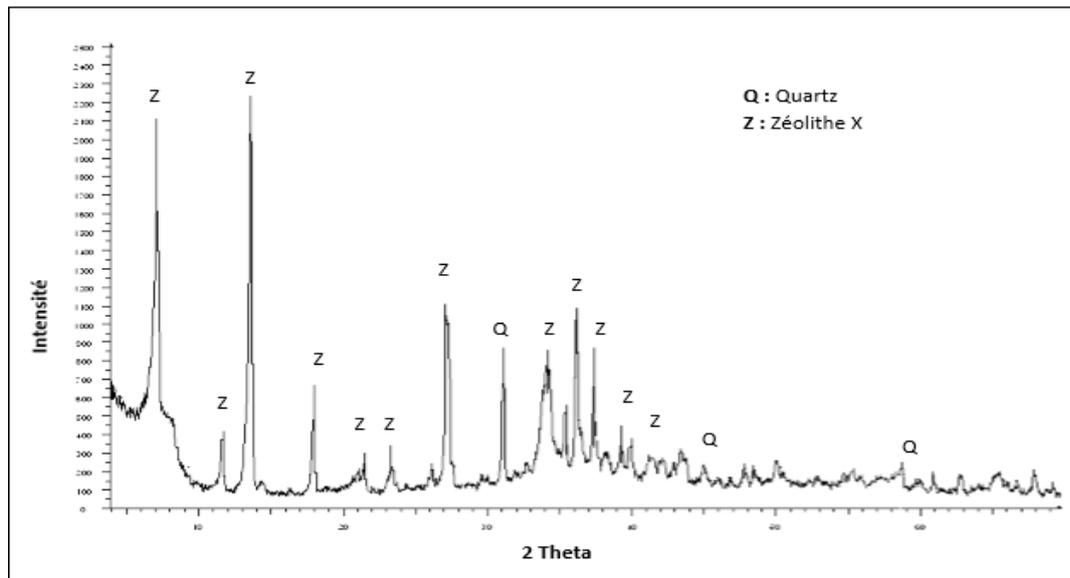
##### III.3.3.1.1. Ciment utilisé

Afin que cette étude couvre les objectifs à savoir préparer un ciment composé de zéolithe afin de tester la pouzzolanité de cette dernière et déterminer les propriétés physiques et mécaniques du ciment composé, nous avons utilisé un ciment non composé de type CEM I-CRS-42,5N de la cimenterie de la compagnie « LAFARGE » de Sig. La composition minéralogique montre que le clinker de ce ciment est composé de : 60,88%  $C_3S$  ; 16,43%  $C_2S$  ; 7,41%  $C_3A$  ; 10,56%  $C_4AF$ , 1,38% CaO libre. La composition chimique du ciment utilisé est présentée dans le tableau III.9 [19].

**Tableau III.9** : Composition chimique (% massique) du ciment CEM I 42,5 N de Sig[19]

Oxydes	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	FeO <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Cl
<b>Ciment%</b>	66,43	5,01	21,74	3,47	1,71	0,68	0,24	0,09	0,01

Le diffractogrammes ci-dessous montres les résultats de l'analyse par DRX d'une la zéolithe synthétisée à partir de la boue de forage et les résultats des analyses par DRX de zéolithe synthétisée à partir de la vase sont présentés dans l'Annexe N° 04.



**Figure III.9:** Diffractogramme d'une zéolithe synthétisée à partir de la boue de forage[19].

### III.3.3.1.2. Sable utilisé

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur les qualités du béton et du mortier. Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments nocifs. Dans cette étude expérimentale, il est utilisé du sable normalisé (ISO normalisé certifié CEN, EN 196-1) produit de la société Française "Société Nouvelle du Littoral". C'est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondi. Il est séché et criblé, puis conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun  $1\,350 \pm 5$  g.

### III.3.3.2. Évaluation de l'activité pouzzolanique des bétons à base de la zéolithe

#### III.3.3.2.1. Evaluation des zéolithes synthétisées par l'essai de chaux saturée

Le test de chaux saturée est basé sur la détermination, par analyse chimique, du taux des ions calcium  $\text{Ca}^{2+}$  de la portlandite consommée par le matériau pouzzolanique (zéolithes X synthétisées à partir de la boue de forage. La consommation des ions calcium dans le mélange  $[(\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{pouzzolane})]$  montre la réaction entre la chaux et la silice ou l'alumine réactive de cette pouzzolane et témoigne donc de la pouzzolanité du matériau.

**Tableau III.10.** Les pourcentages de CaO consommé par les zéolithes en se basant sur les résultats du volume de l'EDTA du dosage des ions calcium non fixés.

Nature de la Zéolithe	Activité pouzzolanique (% CaO consommé) après :		
	02 jours	07 jours	28 jours
<b>Zéolithe (X)</b>	99,32	99,76	99,84
<b>Fumée de silice</b>	92,10	89,43	93,00

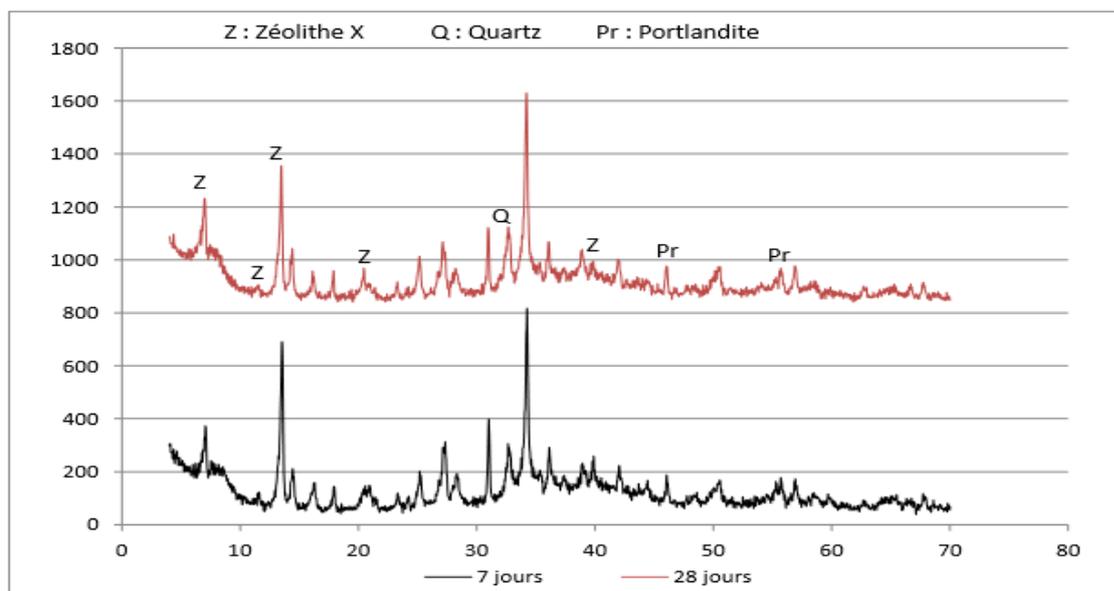
Selon les résultats obtenus, le pourcentage de la chaux consommée par la zéolithe synthétisée est très élevé et dépasse 98% à toutes les échéances, avec une augmentation dans le temps pour atteindre des valeurs supérieures à 99,7% à 28 jours.

Ceci montre que cette zéolithe est caractérisée par une activité pouzzolanique très importante et plus grande que celle de la fumée de silice, ce qui permet de les utiliser avec un pourcentage assez important dans le ciment. En outre, cette zéolithe peut être utilisée pour élaborer un ciment à base d'un ajout andésitique (éco-ciment) tout en réduisant les émissions de CO<sub>2</sub> résultant de la fabrication du clinker.

#### III.3.3.2.2. Etude par DRX des pâtes mélangées avec de la zéolithe

L'analyse par diffraction des rayons X des pâtes des mélanges (Chaux hydraulique Zéolithe synthétisée) a été utilisée afin de confirmer l'activité pouzzolanique de ces zéolithes. Le résultat obtenu, présenté par les diffractogrammes RX, est donné dans le Figure III.11.

Les intensités des pics caractéristiques des zéolithes ont diminué avec formation d'un pic entre  $2\theta/20^\circ$  et  $2\theta/50^\circ$  qui est le domaine du gel de C-S-H/C-A-H, même à très court terme (7 jours d'hydratation). Le pic de portlandite apparaît très faible, ce qui montre que ce minéral additionné au mélange de pâte a été quasi-consommé au bout de 7 jours d'hydratation. Avec l'âge de l'hydratation de la pâte, la formation des hydrates, la disparition de portlandite et la diminution des intensités des pics de zéolithe augmentent. Ce résultat confirme la consommation de la portlandite par la zéolithe synthétisée pour former le gel des hydrates par une réaction pouzzolanique, et donc cette zéolithe est fortement pouzzolanique.



**Figure III.10** : Diffractogramme RX de la pâte « chaux- zéolithe X », après 7 et 28 jours d'hydratation [31].

### III.3.3.2.3. Résistance mécanique de ciment composé de zéolithe

Le tableau III.11 englobe les résultats résistance à la compression à 2, 7 et 28 jours obtenus pour le ciment composé renfermant la zéolithe X synthétisée à partir de la boue de forage.

**Tableau III.11** : Résistance à la compression à 2, 7 et 28 jours du ciment composé de 10 et 20% de zéolithe X comparée au ciment témoin (CEM I-CRS-42,5 N)[31].

Type de ciment	Résistance à la compression (MPa)		
	02 jours	07 jours	28 jours
CEM I-CRS-42,5N	14,063	32,5	56,875
CEM I-CRS-42,5N + 10% zéolithe	6,125	21,875	49,312
CEM I-CRS-42,5N + 20% zéolithe	0,625	1,25	18,125

Selon les résultats repris dans le Tableau III.11 nous avons tracé la variation de la résistance à la compression du ciment composé de 10 et 20% de zéolithe X et du ciment témoin (CEM I-CRS-42,5 N) avec le temps de durcissement et elle est présenté dans l'annexe N° 05.

### III.3.3.3. Principales propriétés du béton à base de la zéolithe X

Selon l'analyse chimique (test de chaux saturée), l'analyse thermique (DSC-ATG) et la DRX, les zéolithes synthétisées (A, Na-P2 et X) sont fortement pouzzolaniques. Pour confirmer cette activité pouzzolanique l'étude de la réactivité hydraulique du ciment composé de 10% des zéolithes synthétisées en les comparant au ciment témoin (sans addition) qui est de type CEM I-CRS-42,5N.

Les ciments élaborés ont une prise rapide même si elle est plus lente que celle du ciment témoin. Les valeurs enregistrées sont dans les normes, ce qui témoigne l'activité pouzzolanique de cette zéolithe.

## III.4. CONCLUSION

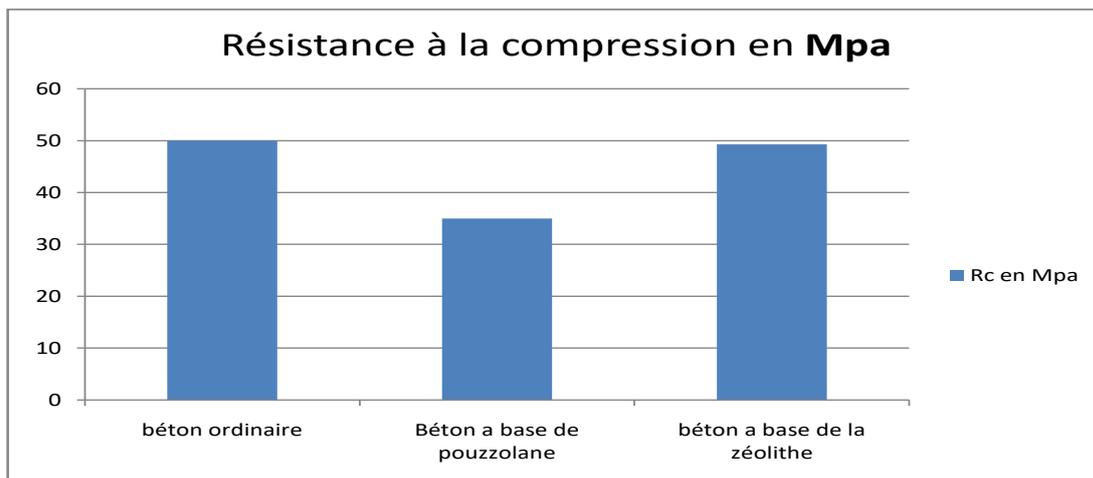
Par comparaison, les échantillons de béton contenant les ajouts pouzzolaniques sont énormément plus résistants à l'agression d'une solution d'acide sulfurique que le béton ordinaire sans pouzzolane est généralement admis que les pouzzolanes ont besoin de moins d'énergie pour leur broyage que le clinker et que l'utilisation de matériaux pouzzolaniques dans le ciment ou dans le béton entraîne de nombreuses propriétés bénéfiques, comme la faible chaleur d'hydratation, la résistance à la compression élevée, la faible perméabilité, la haute résistance aux sulfates et la faible activité de l'alcali-silice.

Les analyses des propriétés d'un béton confectionné par un ciment à base de la zéolithe, nous constatons que la zéolithe a un effet positif sur le développement de la résistance mécanique d'un béton ce qui permet de substituer et de diminuer jusqu'à 10% de clinker par cette zéolithe active. La résistance à la compression du ciment élaboré avec 20% de zéolithe X est moins importante voir insignifiante par rapport au ciment témoin.

D'autre part, on constate que la quantité en ciment (le dosage) dans un béton ordinaire est un facteur clé pour l'amélioration dans les propriétés physiques et mécaniques (la résistance et la compression, l'attraction) et chimique (l'érosion, la réduction), par contre les pouzzolanes dans un béton favorisent le gonflement et la fissuration lors de l'incorporation de ce dernier avec des quantités suffisamment importantes (+20%), et même remarque pour les bétons à base de la zéolithe ce dernier lorsqu'il se présente avec des proportions supérieures à 20% dans un béton, le ciment perd ces caractéristiques et le béton résultant devient colmaté et joue le rôle d'une colle sans efficacité et sans résistance.

**Tableau III.12 :** La comparaison entre la résistance à la compression pour les trois types du béton

Type de béton	Béton ordinaire	Béton pouzzolanique	Béton à (10%) zéolithie
Rc en (MPa)	50	35	49,3



**Figure III.11.** Les résistances à la compression des trois types du béton étudié.

# ***CONCLUSION GENERALE***

## CONCLUSION GENERALE

En conclusion, la construction et le développement urbain est proportionnelle à la qualité de béton utilisé et le mentaux des travaux de la construction et des travaux publique d'un pays et dépend en grand partie de la capacité industrielle de la production des ciments et ce dernier capable d'améliorer le secteur économique et de diminuer la facture d'importation.

Pour améliorer la qualité des ciments et diminuer la quantité de clinker dans les ciments, plusieurs types d'ajout minérales ont été proposés et de nombreuses études de recherche ont été effectués sur ce sujet et parmi elle,

La confection d'un béton ordinaire par l'utilisation d'un ciment portland et la variation de la quantité du ciment dans béton et la détermination du degré d'influence de la quantité du ciment ajouté sur les propriétés mécaniques d'un béton ainsi que la fixation de ces propriétés comme référence pour l'évaluation des propriétés des bétons confectionnés par les autres ajouts minéraux tel que la pouzzolane et la zéolithe.

Les principaux résultats ont révélé que la résistance à la traction par flexion des bétons étudiés avec les différents taux de substitution de la pouzzolane, diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout que ce soit pouzzolane ou zéolithe.

La validité et la résistance mécanique d'un béton fabriqué par l'ajout de la zéolithe au ciment utilisé et dépend de la quantité de la zéolithe ajouté pour remplacer le clinker dans le ciment, ça veut dire que cette quantité de la zéolithe ajoutée doit être entièrement contrôlée pour les propriétés du ciment fabriqué par apport à celle du ciment de référence (le ciment portland).

# ***REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES***

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] **ADJISSA MASSINISSA & AYADEN BRAHIM** (2019). Analyse et enrichissement de minerai de fer de Gara Djebilet. Mémoire de Fin d'étude. Université Abderrahmane Mira Bejaia.
- [2] **MOUSSI KARIMA & A. AZZI**(2007). Modélisation d'un four rotatif à ciment : Cas de l'unité de Sour El-Ghozlane. Mémoire de Fin d'étude. Université des sciences et de la technologie houari Boumediene.
- [3] **N. BELASBELARIBI, M. SEMCHA ET L. LAOUFI.**(2011) Influence de la pouzzolane de Beni-saf sur les caractéristiques mécaniques des bétons Article in Canadian Journal of Civil Engineering · DOI: 10.1139/103-029
- [4] **BOUBAAYA HASSEN - KHAREF HOCINE & ROUABHI YUCEF** (2017) Caractérisation des paramètres de combustion d'un four industriel : cas de cimenterie de Hammam Dhalaa à M'sila Mémoire de Masteracadémique En mécanique. Université mohamedboudiaf - m'sila.
- [5] **AMARG GUETTOUCHE. ABDELGHANI MERDAS.** Valorisation des déchets de four à ciment (CKD) de la cimenterie d'Ain-Al-Kebira (Algérie) dans le Mortier. Conférence Papier · Décembre 2019. Université de Frehat AbbaseSétif.
- [6] **BEN KAIDA, A &OUANID, F. Z.** (2014). Influence de la poudre de verre sur les propriétés physiques et mécaniques des ciments binaires et ternaires (Doctoral dissertation).
- [7] **ESSAIDE, A.** (2017). Application de l'AMDEC aux deux broyeurs (a boulet et a galets) de LAFARGE M'sila (Doctoral dissertation, Universite Mohamed Boudiaf-M'sila).
- [8] **BOUHIDEL Mouna& BOURMADA Noureddine** (2009).Application d'analyse du cycle de vie (ACV) pour un développement durable : cas des cimenteries algériennes. Mémoire de fin d'étude université el-hadj Lakhdar Batna.
- [9] **KOUTTI Fateh&GOUCHENE Hamid**(2019) Etude des méthodes d'analyse et contrôle de la qualité du ciment (Cas de la société du ciment SPA Biskria). Mémoire de fin d'étude école nationale supérieure des mines et de la métallurgie AmarLaskri-Annaba.
- [10] **BENCHEIKH Amel & Dr. MEDDAH Abdelaziz** (2016)Contribution à la caractérisation d'un ciment à base dulaitier +5 % de calcaire. Mémoire de fin d'étude. Université Mohamed Boudiaf -M'sila.
- [11] **BOUFEDAH BADISSI Ahmed &BENTALHA Malika** (2011) Influence de la granularité sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des bétons ordinaires. Mémoire de magister de l'université de Constantine.
- [12] **IKHLASSelloum& NETTOUR D** (2019) Contribution à la Caractérisation d'un Ciment à base du laitier /cas de la cimenteries Ain Touta –Batna mémoire de fin d'étude. École nationale supérieure Annaba.

- [13] **S.LALDJI.**(2012). Caractéristiques fondamentales du Béton. Cours –ETS.
- [14] **BLIZAK Ahmed Kalil&MAZA Mekki (2016)** influence de sable mixte sur les propriétés du béton au ciment blanc. Mémoire de fin d'étude université M'sila
- [15] **MOUSSA Abdul Karim & RANAIVONIARIVO Gabriely(2017)** Contribution à l'étude devalorisation de la pouzzolane - quelques applications Mémoire de fin d'études Université d'antananarivo.
- [16]**HAMDI Belkacem &BELKACEMI Samir (2019)** Influence du taux d'ajout de pouzzolane sur les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des ciments. Mini projet de Licence Professionnelle Université de Bouira.
- [17] **GERYVILLE Djohar& KACIMI Larbi (2016).** Etude et amélioration de l'activité pouzzolanique de certains matériaux silicates pour une substitution partielle du clinker dans le ciment portland. Mémoire de magister.Université des sciences et de la technologie d'Oran – Mohamed Boudiaf.
- [18]**HABOUL Samia&MERAKCHIAkila(2018).** Etude de l'influence du gypse et de la pouzzolane sur les propriétés du ciment. Rapport de soutenance Université Akli Mohand Oulhadj BOUIRA.
- [19] **TERBECHEOuafaa& Mr. KACIMI Larbi. (2011)**Elaboration de matériaux zéolithiques à partir de déchets industriels pour une utilisation comme pouzzolane active dans un ciment ternaire)Mémoire pour l'obtention du diplôme de magister.Université des sciences et de la technologie d'Oran
- [20] **BELBACHIR NASRINE &SEMCHA Abdélaziz(2012).** Etude des propriétés mécaniques à court terme de béton à base de ciment Pouzzolanique de synthèse. Mémoire de magistère université Abdelhamid ibn badis Mostaganem.
- [21] **Sonia ABID&MR.R. DENOYEL et Mme A. SMITH (2014).** Matériaux composites à haute tenue thermique : influence de la micro-nanostructure sur les transferts moléculaires, électroniques et thermiques. Thèse doctorat université de Toulon.
- [22] **BOUH MID Mama &KACIMI Larbi (2011)** Elaboration d'un éco-ciment pouzzolanique à base de vase de barrage hydraulique traitée et déchets de brique de construction. Mémoire de magistère. Université d'Oran.
- [23] **HanaaFares.(2009)** Propriétés mécaniques et physico-chimiques de Bétons autoplaçants exposés à une température élevée. Matériaux. Université de Cergy Pontoise, 2009. Français.
- [24] **Mansour, M., Abadlia, M., &Bekkour, K. (2010).** Effet de la pouzzolane sur le comportement rhéologique des pâtes cimentaires. Revue de mécanique appliquée et théorique, 2(3), 255-263.
- [25]**L.Laoufi, Y. Senhadji, A. Benazzouk, T. Langlet, M. Mouli, I. Laoufi, A. S. Benosman.(2016)** Evaluation de la durabilité de mortiers pouzzolaniques exposés à

une attaque chimique. Article universitaire J. Mater. Environ. Sci. 7 (5) 1835-1845  
ISSN : 2028-2508 CODEN : JMESC le 12 avril 2016.

[26] **Mouheb CHEBBI & Arnaud Travert** (2016) Piégeage d'espèces iodées volatiles sur des adsorbants poreux de type zéolithique dans le contexte d'un accident nucléaire grave) thèse l'Université de Lorraine.

[27] **Albert, N.** (2013). Comportement des bétons ordinaire et à hautes performances soumis à haute température : application à des éprouvettes de grandes dimensions (Doctoral dissertation, Cergy-Pontoise).

[28] **T.Langl** Evaluation de la durabilité de mortiers pouzzolaniques exposés à une attaque chimique. Article universitaire (université J. Mater)

[29] **Yasser Amine, Nordine Leklou, Ouali Amiri, Rachid Cherif.** (May 2015) Etude de l'influence des additions minérales sur la réaction sulfatique interne dans les matériaux cimentaires. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. hal-01167683

[30] **Mekatel, H.** (2008). Utilisations des zéolithes de type A et X dans la récupération des métaux par réactions d'échange d'ions (Doctoral dissertation).

[31] **Rouina, K., Oualtache, K., & Benbouzid, M.** (2019). Elaboration de la zéolithe ZSM-12 et étude de sa capacité de chargement d'un principe actif.

[32] **A.H. MOHAMMED BELHADJA, A. MAHIB, R. DERBALC,** (2019). Evaluation de La Durabilité du Béton Pouzzolanique Fibré dans des Milieux Acides. 24<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique.

# ***ANNEXES***

## ANNEXE N°01.

**Tableau I.2:** Désignation des différents types du ciment en fonction de leur composition

	Ciment portland	Ciment portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pouzzolaniques		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CHF-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC-CEM V/A	CLC-CEM V/A
<b>Clinker (k)</b>	≥95%	≥ 80% ≤ 94%	≥65% ≤79%	≥35% ≤64%	≥20% ≤34%	≥5% ≤19%	≥65% ≤90%	≥45% ≤64%	≥40% ≤64%	≥20% ≤39%
<b>Laitier (S)</b>	*	6%≤	21%≤	≥36% ≤65%	≥66% ≤80%	≥81% ≤95%	*	*	≥18% ≤30%	≥31% ≤50%
<b>Pouzzolanes (Z)</b>	*	Total	Total	*	*	*	10%≤	36%≤	18%≤	31%≤
<b>Cendres siliceuses (V)</b>	*	≤20%	≤20%	*	*	*	Total ≤35%	Total ≤55%	Total ≤30%	Total ≤50%
<b>Fumée de silice (D)</b>	*	(Fumée de silice	(Fumée de silice	*	*	*	(Fumée≤10%	(Fumée≤10%	*	*
<b>Cendres calciques (W)</b>	*	≤10%)	≤10%)	*	*	*	*	*	*	*
<b>Schiste (T)</b>	*	≤10%)	≤10%)	*	*	*	*	*	*	*

## ANNEXE N°2

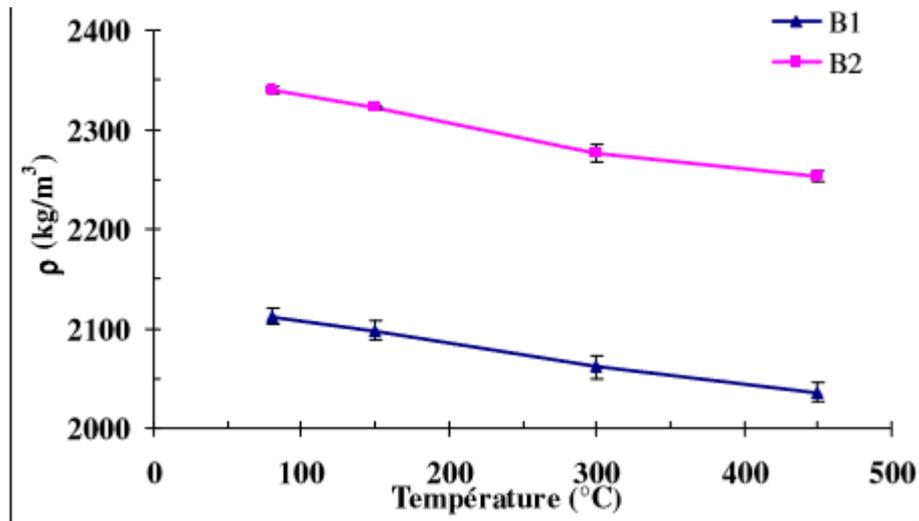


Figure .1 : Masse volumique apparente en fonction de la température

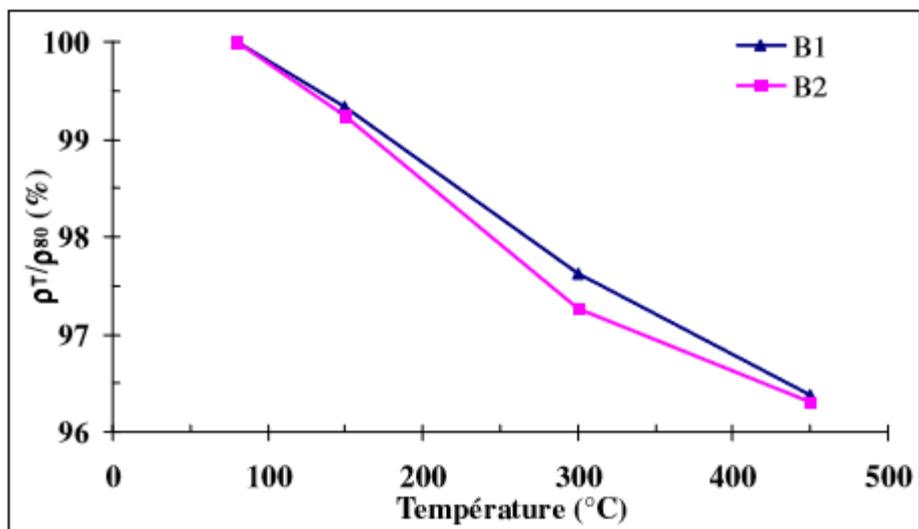
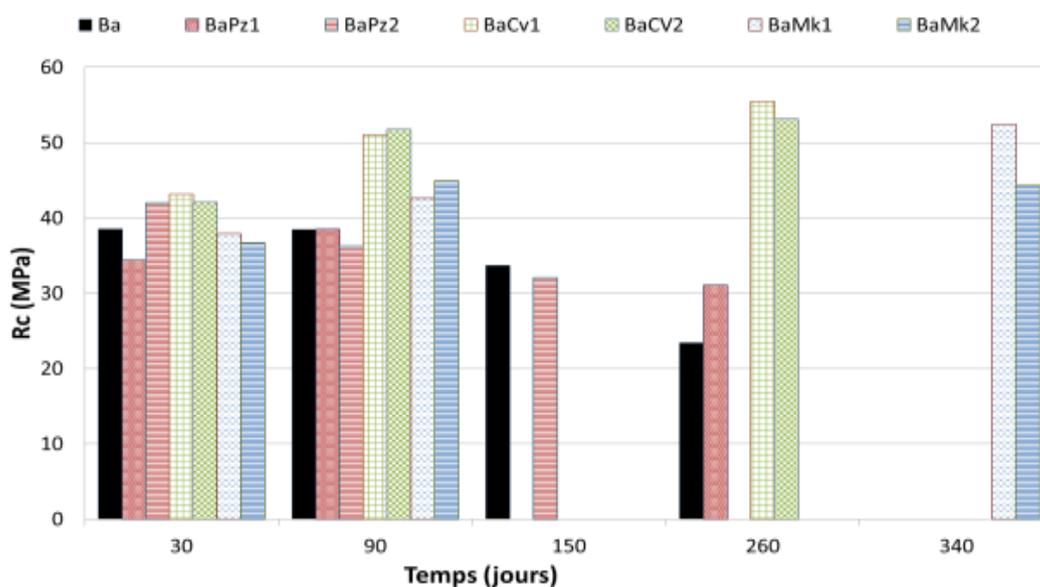


Figure .2 : Masse volumique relative en fonction de la température

D'une manière générale, la masse volumique apparente des deux compositions de bétons baisse en fonction de la température de chauffage. Le comportement est similaire pour les deux bétons (figure III-2). La perte de masse volumique est de l'ordre de 3.5% pour les deux bétons étudiés à 450°C.

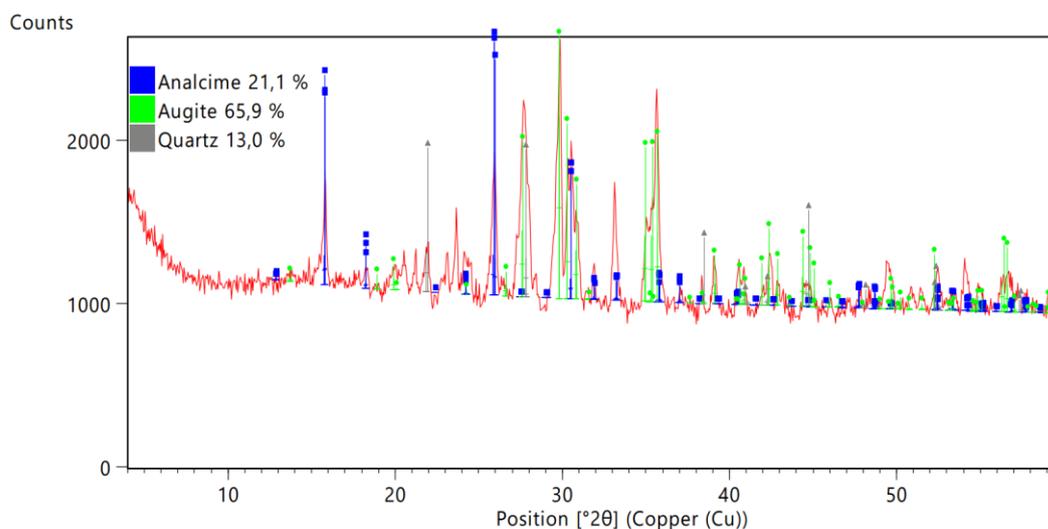
**ANNEXE N°03**

Comparaison des résistances à la compression entre un béton ordinaire (Ba) et deux bétons à base de la pouzzolane (Pz1 et Pz2) et deux bétons a base de kaolin (Mk1 et Mk2).



**Figure .3.** Evolution de la résistance à la compression du béton témoin (Ba) et des bétons avec les additions à 15% (Pz1 et Pz2, Mk1 et Mk2, Cv1 et Cv2) [31]

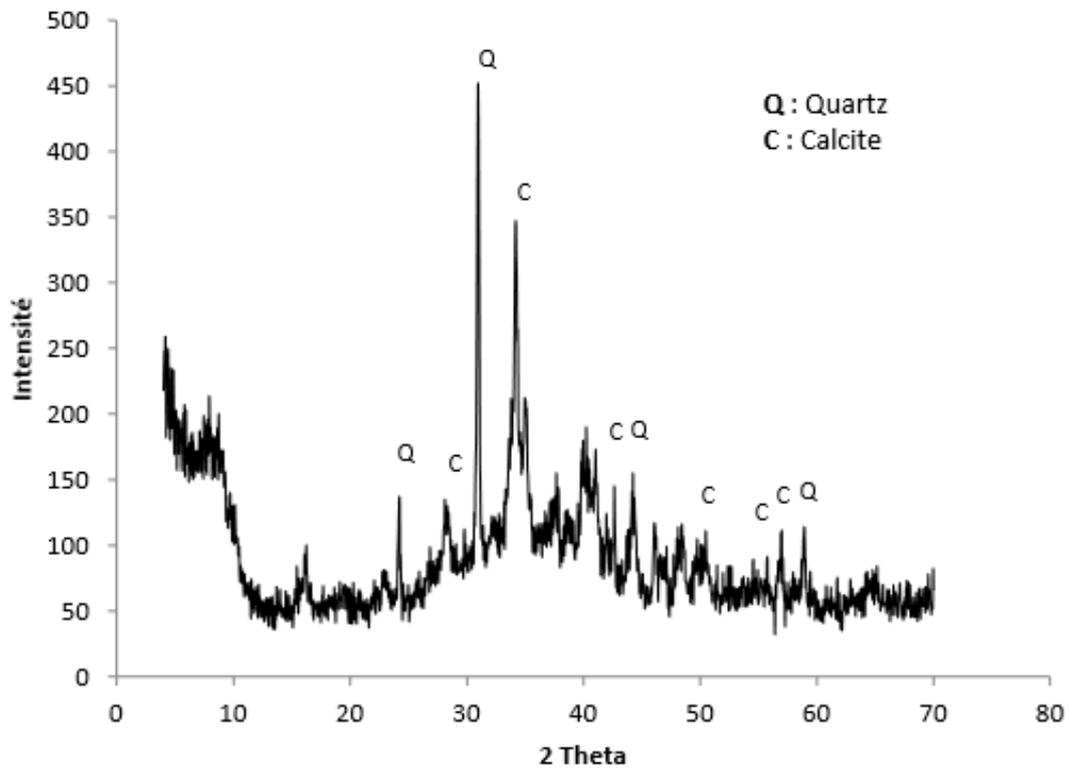
Cette figure nous montre que dans le cas des bétons de référence (Ba) et BaPz1 et BaPz2 atteint La formation différée d'ettringite (encore souvent appelée «Delayed Ettringite Formation » ou DEF) par réaction sulfatique interne (RSI) [29], on constate que la cinétique du gonflement est directement corrélée à l'évolution des résistances mécaniques, du module dynamique et de la porosité.



**Figure .4 :** Diffractogramme(DRX) de l'échantillon de pouzzolane.[32]

## ANNEXE N° 04 :

Les résultats de l'analyse par DRX des zéolithes synthétiques

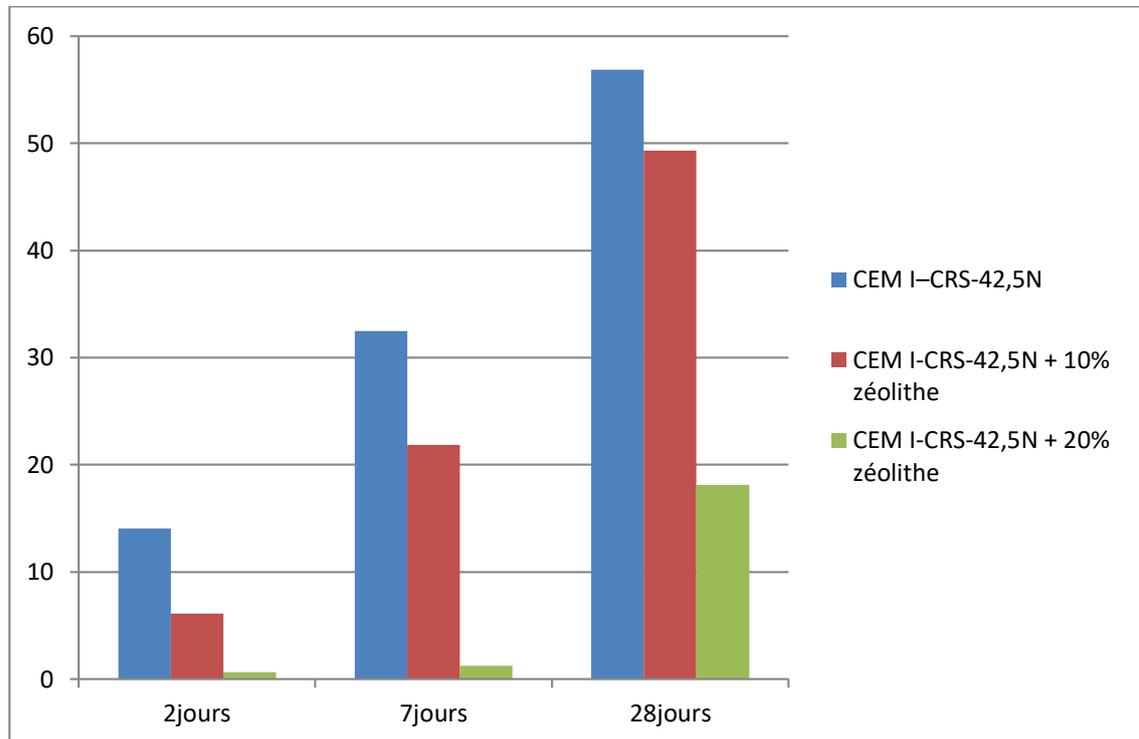


**Figure .5 :** Diffractogramme RX de la zéolithe X synthétisée à partir de la vase [32]

L'examen du diffractogramme de la Figure III-1 montre que la zéolithisation de la vase selon le protocole principal a conduit à la formation de la phase amorphe, aucune raie caractéristique de zéolithe n'est apparue. Les seules phases cristallines identifiées sont le quartz et la calcite propres à la vase brute.

## ANNEXE N°05 :

La résistance à la compression d'un ciment a base da la zéolithe synthétique



**Figure .6** : Résistances à la compression des ciments composés de 10 et 20% de zéolithe X et du ciment témoin après 2, 7 et 28 jours de durcissement

Les résultats montrent que les résistances du ciment composé 10% de zéolithe X sont assez importantes, elles sont caractérisées par une faible augmentation de la résistance (02 et 07 jours) puis une évolution conséquente à 28 jours qui est presque équivalente à celle du ciment témoin.

## **Résumé**

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.

Ce travail présente la caractérisation des ciments à base de matériaux pouzzolanique notamment la pouzzolane naturelle et la zéolithe. Il consiste à une présentation des méthodes d'évaluation de l'action des matériaux pouzzolaniques sur les matériaux cimentaires, par une étude comparative entre trois types de bétons à base de la pouzzolane, zéolitique et ordinaire.

D'après les résultats d'analyses de différentes études consultées, il ressort que l'utilisation de matériaux pouzzolaniques dans le ciment ou dans le béton entraîne de nombreuses propriétés bénéfiques, comme la faible chaleur d'hydratation, la résistance à la compression élevée, la faible perméabilité, la haute résistance aux sulfates et la faible activité de l'alcali-silice.

**Mots clés** : Béton, pouzzolanes, zéolithes, ciment, matériaux cimentaires.

## ملخص

تعتبر الإضافات الإسمنتية النشطة البوزولانية حاليًا من بين أحدث التطورات في إنتاج الأسمنت ، لأن استخداماتها تؤدي إلى تحسين الخواص الميكانيكية للمواد الإسمنتية

يقدم هذا العمل توصيف الأسمنت على أساس المواد البوزولانية بما في ذلك البوزولانا الطبيعي والزيوليت. وهو يتألف من عرض تقديمي لطرق تقييم تأثير المواد البوزولانية على المواد الإسمنتية ، من خلال دراسة مقارنة بين ثلاثة أنواع من الخرسانة على أساس البوزولانا والزيوليت والعادي

وفقًا لنتائج تحليلات الدراسات المختلفة التي تم الرجوع إليها ، يبدو أن استخدام المواد البوزولانية في الأسمنت أو الخرسانة يؤدي إلى العديد من الخصائص المفيدة ، مثل انخفاض درجة حرارة الماء ، وقوة الضغط العالية ، والنفاذية المنخفضة ، ومقاومة عالية للكبريتات وانخفاض القلويات- نشاط السيليكا

**الكلمات المفتاحية:** الخرسانة ، البوزولان ، الزيوليت ، الأسمنت ، المواد الإسمنتية

## **Summary**

Active cementitious additions of a pozzolanic character are currently part of the most developments in the production of cement because their use provides an improvement in the mechanical properties of cementitious materials .

this work describes the characterization of types of cement based on pozzolanic materials ,in particular natural pozzolana and zeolite .

it consists of a presentation of methods for evaluating the action of pozzolanic materials on cementitious materials through a comparative study the results of analyzes of different studies consulted ,it appears that's the use of pozzolanic materials in cement or concrete leads to many beneficial properties ,such as low heat of hydration,high compressive strength,low permeability, high resistance to sulphates and low alkali activity.

**Keywords:** Concrete, pozzolans, zeolites, cement, cementitious materials.