



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. MIRA – BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil

Mémoire de fin de cycle
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

En Génie Civil

Option : Structure

Thème :

Influence de l'ajout de pouzzolane naturelle (tuf)
Sur la durabilité des pâtes de ciment

Présenté par :

M_r AMRI SOFIANE

M^{lle} BOUGHANEM AKILA

Encadré par :

D_r BOUZIDI Mohamed Amin

Membres du jury :

D_r AREZKI Samia

P_r CHELOUAH Nacer

Année universitaire 2018/2019

Remerciement

Nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr BOUZIDI Mohamed Amin. Nous le remercions pour la qualité de son encadrement exceptionnel, sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire. Nous avons vraiment voulu vous remercier car on a beaucoup de chance de vous avoir comme encadrant de notre mémoire.

Nous remercions vivement les membres du jury pour nous avoir honorés en acceptant de juger ce travail.

Nous remercions aussi :

Le technicien du laboratoire MDC Mr ZOUBIRI Djamel pour sa disponibilité et sa compréhension au niveau de laboratoire.

Nous remercions aussi le docteur MEZHOUD Djillali pour ses précieux conseils, son aide et son orientation.

Nous remercions aussi l'ensemble des techniciens du laboratoire de la cimenterie de Ain El kebira qui ont acceptés de faire notre stage pratique au sein de cette cimenterie et surtout pour les conseils qu'ils ont pu nous donner au cours de ce mois de stage.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents Brahim et Atika. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour d'ont-ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure la bonne santé et longue vie.

Bien sûr à mon adorable sœur Siham qui a été toujours à mes côtés et à mes chers frères Massi, Nassim et Salas

A mon oncle Rabeih et sa femme Nawel qui m'ont toujours encouragé durant tout le parcours de mes études sans oublié ma chère tante Rachida.

A toute ma famille grand et petit

A mon binôme Sofiane

Sans oublié mes amis Kahina, Kahou, Katia, Ounissa, Kenza, Tiziri, Wissem, Hassiba, Samira, Hanane

A mes amis surtout mes copines du bloc M de la résidence 17 Octobre 1962

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible,

Je vous dis merci

B. Akila

Dédicaces

*C'est avec une profonde gratitude et sincères mots,
Que nous dédions ce modeste travail de fin d'étude à
Nos chers parents, qui ont sacrifié leur vie pour
Notre réussite et nous ont éclairé le chemin par
Leurs conseils judicieux.*

*Nous espérons qu'un jour,
Nous pourrons leur rendre un peu de ce qu'ils ont
Fait pour nous, que dieu leur prête bonheur et longue
vie.*

*Nous dédions aussi ce travail à mon frère et
Ma Sœur, nos familles, nos amis,
Ma binôme Akila*

*Tous nos professeurs qui nous ont enseigné
Et à tous ceux qui nous sont chers*

A. Sofiane

TABLE DES MATIERES

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale..... 1

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

I.1. Historique du ciment 3

I.2. Définition du ciment 4

I.3. Les étapes de fabrication du ciment 4

 I.3.1. Voie humide 4

 I.3.2. Voie semi-humide 5

 I.3.3. Voie semi sèche 5

 I.3.4. Voie sèche 5

I.4. Les constituants du ciment 7

 I.4.1. Les Constituants principaux 7

 I.4.1.1. Le clinker et sa composition chimique 7

 I.4.1.2. Le gypse 10

 I.4.2. Les constituants alternatifs 11

 I.4.2.1. Un filler calcaire (matériau inerte) 11

 I.4.2.2. Les pouzzolanes 11

 I.4.2.2.1. Historique 11

 I.4.2.2.2. Définitions 11

 I.4.2.2.3. Les types de pouzzolanes 12

 I.4.2.2.4. Les propriétés chimique et physique de la pouzzolane 15

I.5. Les types de ciment 15

I.6. L'hydratation du ciment 16

I.6.1. Hydratation des Aluminates tricalcique C_3A ou $3CaO.Al_2O_3$	18
I.6.2. Hydratation d'Aluminoferrite de calcium C_4AF	19
I.6.3. Hydratation de C_3S	19
I.6.4. Hydratation de silicate bicalcique (C_2S)	21
I.7. Les propriétés des produits d'hydratation.....	21
I.7.1. Les silicates de calcium hydratés C-S-H.....	21
I.7.2. La portlandite	21
I.7.3. Ettringite	22
I.7.4. Le monosulfoaluminate de calcium hydraté	22
I.8. Mécanisme de la réaction pouzzolanique	23
I.8.1. Chaleur d'hydratation	24
I.9. L'impact environnemental de la production de ciment	24
I.10. Solution intervenant à l'impact environnemental	24
I.11. L'intérêt de l'utilisation de la pouzzolane	25
a)Intérêt de points de vue écologiques et environnementaux	25
b)Intérêt du point de vue économique	25
c)Intérêt du point de vue technique	25
I.12. Les inconvénients de l'utilisation de la pouzzolane.....	26
I.13. L'utilisation des ajouts en Algérie	26
I.14. Etat de l'art sur utilisation de la pouzzolane naturelle	27
Conclusion.....	30
CHAPITRE II : Matériaux et méthodes	
II.1. Matériaux utilisés	31
II.1.1. Le ciment	31
II.1.2. Le tuf.....	31
II.1.3. L'eau de gâchage	31

II. 2. Les essais effectués sur les matières premières	31
II. 2. 1. Analyse physique.....	31
II.2.1.1. Masse volumique absolue (NF P18-555)	31
II.2.1.2. Essais de la surface spécifique de Blaine (SSB).....	33
II.2.1.3. L’essai de la granulométrie laser	34
II. 2. 2. Analyse chimique et minéralogique	35
II. 2. 2.1. Essai de la fluorescence X	35
II.3. Confection des éprouvettes	37
II.3.1. Matériels nécessaires	37
II.3.2. Quantité de matériaux	38
II.3.3. Procédures de malaxage	39
II.3.4. Conservation des éprouvettes	40
II.4. Les essais effectués sur les éprouvettes	42
II.4.1. Attaque chimique (sulfate de magnésium)	42
II.4.2. Résistance à la compression	43
II.4.3 Analyse par spectrométrie infrarouge (IRTF)	44
Conclusion.....	45
CHAPITRE III : Résultats et discussion	
III.1. Caractérisations de la matière première	46
III.1.1. Analyse physique	46
III.1.1.1. La masse volumique absolue	46
III.1.1.2. La surface spécifique de Blaine	46
III.1.1.3. La granulométrie laser	46
III.1.2. Analyse chimique et minéralogique :	48
III.1.2.1. Essai de la fluorescence X	48
III.3. Étude de la durabilité des pâtes de ciment	50
III.3.1. La variation de volume	50

III.3.2. La variation de masse	51
III.3.3. La résistance à la compression	53
III.3.4. Spectres infrarouge obtenues	54
Conclusion.....	60
Conclusion générale	61
Références bibliographiques	
Résumé	

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Le ciment portland et les divers constituants qui le composent.....	4
Figure I.2 : Les étapes de fabrication du ciment	7
Figure I.3 : Le clinker.....	8
Figure I.4 : Formation des minéraux du clinker	10
Figure I.5 : Le gypse	10
Figure I.6 : Origine des matériaux pouzzolanique.....	12
Figure I.7 : Le ciment Portland, du cru au ciment hydraté l'alite est le composé majoritaire du clinker.....	17
Figure I.8 : Ettringite.....	22
Figure II.1 : Dispositif expérimental de la masse volumique absolue.....	32
Figure II.2 : Le pycnomètre.....	32
Figure II.3 : Acétone	32
Figure II.4 : La quantité de ciment	34
Figure II.5 : Appareille de Blaine	34
Figure II.6 : L'appareille de la granulométrie laser	34
Figure II.7 : Appareille de broyage (HERZOG).....	36
Figure II.8 : La pastille	36
Figure II.9 : Appareille de fluorescence X (ZETIUM).....	37
Figure II.10 : Un récipient	37
Figure II.11 . Une balance.....	38
Figure II.12 : Eprouvette cylindrique	38
Figure II.13 : Table à choc	39
Figure II.14 : Balance (peser le ciment)	39
Figure II.15 : Balance (peser l'eau)	39

Figure II.16 : Le Malaxage	39
Figure II.17 : Les éprouvettes dans la table à choc.....	40
Figure II.18 : L'échantillon dans l'étuve	40
Figure II.19 : Les éprouvettes dans l'eau.....	41
Figure II.20 : Pied à coulisse	41
Figure II.21 : La balance	41
Figure II.22: Les éprouvettes dans la solution.....	42
Figure II.23: Appareille de compression	43
Figure II. 24 : Pilon	44
Figure II. 25 : Tamis (0.125)	44
Figure II.26 : Appareille de l'infrarouge	45
Figure III.1 : Distribution granulométrique de la taille des particules de ciment(CPA)	47
Figure III.2: Distribution granulométrique de la taille des particules du tuf	48
Figure III.3: Composition chimique du ciment(CPA) et du tuf.	49
Figure III.4 : Variation de volume des échantillons	51
Figure III.5: La variation de masse des échantillons en fonction du taux de pouzzolane et le temps d'immersion.	52
Figure III.6 : La résistance à la compression du ciment en fonction du taux de substitutions et du temps d'immersion.	54
Figure III.7: Spectre infrarouge du ciment anhydre	55
Figure III.8 : Spectres infrarouge des échantillons à 0 jours	56
Figure III. 9 : Spectres infrarouge des échantillons de 7 jours	56
Figure III. 10 : Spectres infrarouge des échantillons de 14 jours.	57
Figure III.11 : Spectres infrarouge des échantillons de 28 jours	57
Figure III.12: Spectres infrarouge des échantillons de 56 jours	58
Figure III.13: Spectres infrarouge des échantillons de 84 jours	58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Processus de fabrication du ciment	9
Tableau I.2 : les différents types de ciment courants	16
Tableau I.3 : Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes	26
Tableau II.1 : Quantité de matériau utilisés.....	38
Tableau III.1 : La masse volumique absolue du ciment et du tuf	46
Tableau III.2 : La surface spécifique de Blaine du ciment et du tuf	46
Tableau III.3 : Analyse de la granulométrie du ciment CPA	47
Tableau III.4 : Analyse de la granulométrie du tuf	48
Tableau III.5 : Composition chimique du ciment CPA et du tuf	48
Tableau III.6 : Composition minéralogique du clinker	50
Tableau III.7 : Variation de volume des échantillons	50
Tableau III.8 : Variation de masse des échantillons.....	52
Tableau III.9 : Résistance à la compression du ciment et du tuf.....	53
Tableau III.10 : Analyse du spectre IR du ciment anhydre.....	55
Tableau III.11 : Analyse du spectre IR du ciment hydraté.....	59

Liste des abréviations

Abréviations et symboles	Notations et Abréviations
CaCO₃	Carbonate de calcium
CO₂	L'oxyde de carbone
CaO	La chaux
SiO₂	La silice
Al₂O₃	L'alumine
FeO₂	L'oxyde de fer
3CaO.SiO₂ (C₃S)	Le silicate tricalcique (Alite)
2CaO.SiO₂ (C₂S)	Le silicate bicalcique (Belite)
3CaO.Al₂O₃ (C₃A)	L'aluminate tricalcique
4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ (C₄AF)	L'alumino-ferrite tétracalcique
MgO	La magnésie
SO₃	Anhydride sulfurique
K₂O	Oxyde de potassium
Na₂O	Oxyde de sodium
CaSO₄.2H₂O	Sulfate de calcium hydraté
3CaO.2SiO₂.3H₂O (CSH)	Silicate de calcium hydraté
Ca (OH)₂ (CH)	Hydroxyde de calcium
H₂O (H)	Eau
C₃A 3(CaSO₄. 2H₂O) H₃₂	Ettringite ou Aft
C₃A (CaSO₄ 2H₂O) H₁₂	Monosulfoaluminate de calcium hydrate ou Afm
C₂AH₈ (CaO)₂-Al₂O₃-(H₂O)₈	Aluminate dicalcique hydraté
C₃AH₆ (CaO)₃-Al₂O₃-(H₂O)	Aluminate tricalcique hydraté
C₄AH₁₃ (CaO)₄-Al₂O₃-(H₂O)₁₃	Aluminate tétracalcique hydraté
C S H	Silicate de calcium hydratée
Ca²⁺	Calcium
OH-	Hydroxyde
C-A-H	Aluminate de Calcium Hydraté
CPA	Ciment portland pur
CEM	Ciment portland

Cl

Chlore

Paf

Perte au feu

SSB

Surface Spécifique Blaine

MEB

Microscope électronique à balayage

Mg SO₄

Sulfate de magnésium

Rc

Résistance à la compression

IRTF

Infra Rouge à Transformée de Fourier

*Introduction
générale*

Introduction générale

Depuis le début de la construction moderne basée essentiellement sur le matériau ciment, la demande de ce matériau augmente de plus en plus, ce qui a conduit à l'augmentation de la cadence de l'industrie cimentaire d'une façon importante.

En effet l'industrie cimentaire consomme une grande énergie et produit une quantité importante de gaz carbonique. Selon certaines études, la fabrication d'une tonne de ciment génère environ une tonne de CO₂. La production du ciment est responsable d'environ 5% des émissions de ce gaz sur la planète ce qui affecte négativement sur l'impact environnementale.

Ces gaz carbonatés résultent de la combustion des hydrocarbures et de la décarbonatation du CaCO₃, contenu dans la matière première, lors de la cuisson du mélange cru pour fabriquer du clinker. Une des solutions pour réduire les effets négatifs de la production du ciment est de substituer partiellement le clinker par des ajouts qui demandent moins d'énergie et causent moins d'émissions de gaz carbonate.

Parmi ces ajouts, on trouve les pouzzolanes qui sont des matériaux naturels ou artificiels, composés des mêmes principaux oxydes contenus dans le ciment Portland, mais de proportions et compositions minéralogiques différentes, elles sont caractérisées par une réaction dite « pouzzolanique ». Cela signifie qu'elles peuvent réagir fortement ou faiblement en présence d'eau avec l'hydroxyde de calcium en le transformant en silicate de calcium et aluminat de calcium hydratés.

Les ciments contenant les ajouts pouzzolaniques sont considérablement plus résistants à l'agression d'une solution d'acide sulfurique que le béton ordinaire sans pouzzolane. Il est généralement admis que l'utilisation de matériaux pouzzolaniques dans le ciment 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. [1].

Le but de notre travail se concentre sur l'évaluation de la durabilité d'un ciment contenant des différents pourcentages de pouzzolane naturelle (tuf) après l'immersion dans l'attaque chimique. Pour se faire, nous avons structuré notre mémoire en trois chapitres qui font suite à une introduction générale et se termine par une conclusion générale.

L'introduction générale nous a permis d'exposer brièvement le contenu du mémoire et la problématique traitée.

Le premier chapitre nous a permis de présenter une synthèse de caractéristiques principales des ciments et des ajouts cimentaires ainsi que leur comportement en terme

d'hydratation et de participation dans le développement des différentes propriétés des ciments durcis.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté des différentes méthodes et appareils de caractérisation utilisés dans la réalisation de notre travail.

Dans le troisième chapitre nous présentons les résultats obtenus expérimentalement ainsi qu'une analyse de ces derniers.

En conclusion générale nous présentons les principales conclusions tirées de l'expérimental ainsi que quelques perspectives.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

Introduction :

Dans ce premier chapitre nous avons donné quelques notions et définitions générales sur le matériau ciment avec un petit passage historique. Les différents processus et les étapes de fabrication du ciment, depuis la préparation des matières premières jusqu'à l'obtention du produit final (le Ciment) sont aussi discutées, comme nous avons parlé sur les pouzzolanes naturelles, leurs caractéristiques et leurs activations.

I.1. Historique du ciment :

L'utilisation et la fabrication du ciment remontent à l'antiquité. En effet, les Romains et les Grecs savaient fabriquer du ciment. Ils utilisaient la chaux (CaCO_3) mélangée avec le sable et des matériaux d'origine volcanique. [2]

Pendant des siècles, la construction n'a utilisé que le mortier de chaux qui présentait, outre une très grande lenteur de durcissement (pratiquement jamais achevé dans l'intérieur des maçonneries) et l'impossibilité de s'employer dans l'eau ou en fondation profonde, une extrêmement faible résistance à encrassement (1-2 kg au cm^2). En 1756, l'Anglais Sweeton découvre la « chaux hydraulique » (provenant de la calcination de calcaires contenant 10 à 20 p. 100 d'argile), plus résistante (7 à 9 kg au cm^2), de prise plus rapide et utilisable dans l'eau, d'où son nom.

C'est en 1824 qu'un briquetier de Leeds, Aspsdin, invente le ciment (par calcination à haute température de calcaires contenant de 20 à 55 p. 100 d'argile) au quelle il donna le nom de Portland en raison, paraît-il, de la ressemblance de sa couleur avec celle des falaises de cette localité du Dorset. Malgré une résistance à la pression beaucoup plus grande (315 kg au cm^2 pour le ciment de qualité courante aujourd'hui), la production du Portland ne se développa que relativement lentement. Ainsi, c'est en 1927 seulement que la production de ciment dépassa en France celle de chaux hydraulique. Celle-ci revenait, jusqu'à cette époque, beaucoup moins cher, car elle ne demande que moitié moins de combustible et un appareillage relativement sommaire. Le ciment fut donc assez longtemps réservé à des usages particuliers. Le développement de sa production et de son utilisation procède, d'une part, des perfectionnements techniques dans cette industrie, d'autre part, d'une grande augmentation et de la transformation des besoins. Les progrès de l'industrie cimentière furent conditionnés par le développement de la connaissance scientifique des processus de fabrication. [3]

Le ciment naturel fait son apparition en France en 1829, lorsqu'un ingénieur des Ponts et Chaussées, M. Lacordaire, soumet à l'expérimentation un banc de calcaire qu'il a découvert à Pouilly, en Côte-d'Or, et c'est en 1842 que le capitaine Breton découvre le ciment naturel de la Porte de France à Grenoble, sur les lieux-mêmes où son beau-père, M. Roze Carrière, exploite une carrière de chaux. Quant au ciment artificiel, né des travaux de Louis Vicat, il apparaît en France en 1850 fabriqué par les usines Dupont et Demarle, à Boulogne-sur-Mer. Joseph Vicat, fils de Louis, installe sa première usine de ciment artificiel à Vif en 1858. [4].

I.2. Définition du ciment :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit suite à un processus d'hydratation qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau [5].

Les normes internationales définissent le ciment Portland comme étant le résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu' à fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile [6].

La figure I.1 suivante présente les composants du ciment à l'état anhydre et à l'état hydraté :

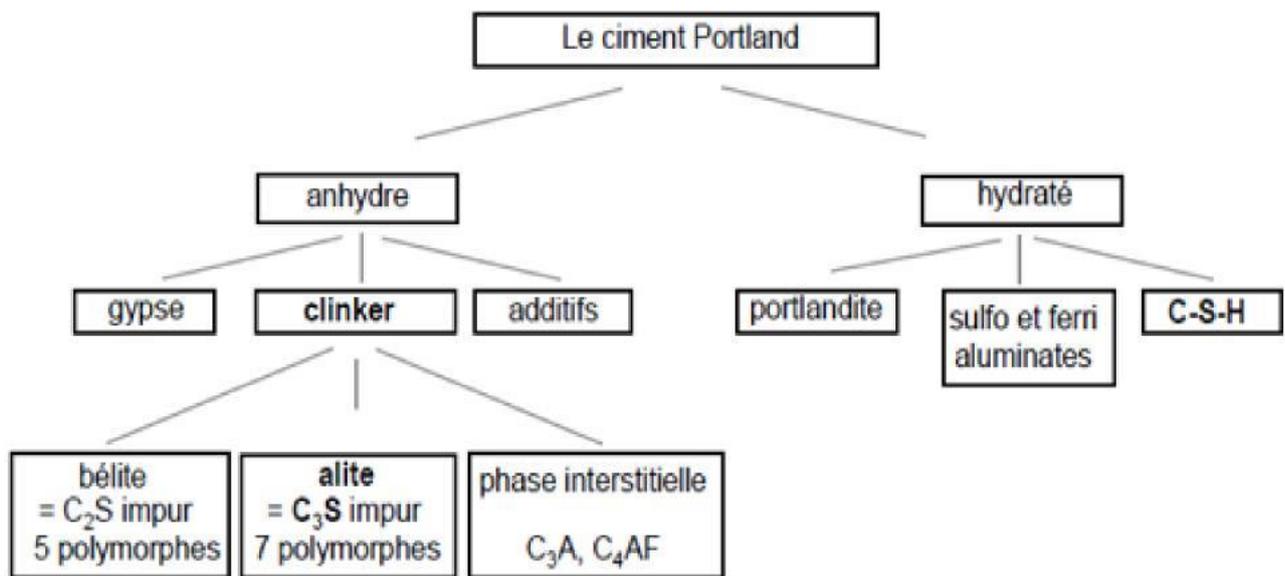


Figure I.1 : Le ciment portland et les divers constituants qui le composent [7]

I.3. Les étapes de fabrication du ciment :

La fabrication de ciment peut se faire par de différentes voies :

I.3.1. Voie humide :

C'est le procédé le plus ancien, le plus simple mais qui demande le plus d'énergie. Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont mélangés et broyés finement avec de l'eau de manière à former une pâte assez liquide puis cette pâte sera envoyée dans des bassins de stockage pour y être homogénéisée mécaniquement. Ensuite le mélange formé subit un traitement thermique(cuisson) dans un four rotatif, le clinker tombe sur des refroidisseurs à grille qui ramènent sa température à 70 °C juste après sa sortie dans le four ; ce choc thermique donne naissance à des granules de diamètres variant entre 1 et 10 mm. Il est ensuite véhiculé vers les trémies des broyeurs où il est

finement broyé avec 3 à 5% de gypse afin de régulariser la prise. Les grains de ciment étant récupérés à la sortie du broyeur et sont expédiés vers des silos cylindriques de stockage [8].

I.3.2. Voie semi-humide :

La fabrication du ciment par voie semi-humide est une dérivée de la voie humide. Elle commence comme la précédente, mais avant d'être introduite dans le four, la pâte est débarrassée d'une partie de son eau grâce à des filtres presses [9]

I.3.3. Voie semi sèche :

Cette voie est une dérivée de la voie sèche. Sa particularité réside dans une manipulation supplémentaire : La farine du ciment est transformée en 'granule' par humidification dans de grandes assiettes rotatives inclinées avant d'être introduite dans le four. [9].

I.3.4. Voie sèche :

La voie sèche est la technique la plus utilisée aujourd'hui. La matière première est préparée sous forme de poudre. La pré-homogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des deux constituants essentiels du ciment par superposition de multiples couches [9].

La procédure de fabrication est détaillée comme suit :

a) Extraction et concassage des matières premières :

Les matières premières (argile, calcaire) sont extraites à partir des parois rocheuses d'une carrière qui se situe généralement juste à côté de l'usine. [10]. Le concassage, fait sur les lieux de l'extraction, réduit la granulométrie des matériaux à environ 50 mm au maximum 150 mm, ensuite les matériaux sont acheminés vers la cimenterie par plusieurs méthodes dépendant de l'éloignement de la cimenterie [11]

b) Le broyage et le stockage des matières premières :

Les minéraux concassés sont ensuite réduits en fines poudres dans la station de broyage pour être chimiquement plus réactives au cours de leurs cuissons dans le four, ce mélange appelé (matière crue) [11].

c) La cuisson des matières premières :

La matière crue est préchauffée à 800°C puis chauffée à 1450°C dans le four rotatif cylindrique horizontal de 50 à 90m de longueur et 4 à 5m de diamètre légèrement incliné et tournant de 1 à 3 tours/minute. [11]. A la sortie du four, le clinker tombe sur des refroidisseurs à grille qui ramènent sa température à 70 °C (la trempe) ; ce choc thermique donne naissance à des

granules de diamètres variant entre 0 à 25 mm [12]. Les matières cuites prennent la forme des grains durs appelés (clinker).

d) Stockage et broyage du ciment :

Le clinker refroidi est stocké dans des silos puis mélangé avec du gypse, c'est cette poudre finement broyée qu'on appelle (le ciment), des constitutions de substitutions comme les pouzzolanes peuvent entrer dans sa composition, cela permet de limiter les émissions de CO₂ et de créer des ciments dans les propriétés variées. Le broyage est nécessaire dans L'objectif d'atteindre une finesse Blaine choisie et de pouvoir fabriquer des ciments composés [12].

e) Le conditionnement et le transport :

Le ciment est stocké dans des silos avant d'être livré en vrac dans des citernes ou d'être conditionné en sacs de 10 à 50 kg pour être transporté par différents moyens de transport [12].

La figure suivante récapitule les étapes de fabrication du ciment :

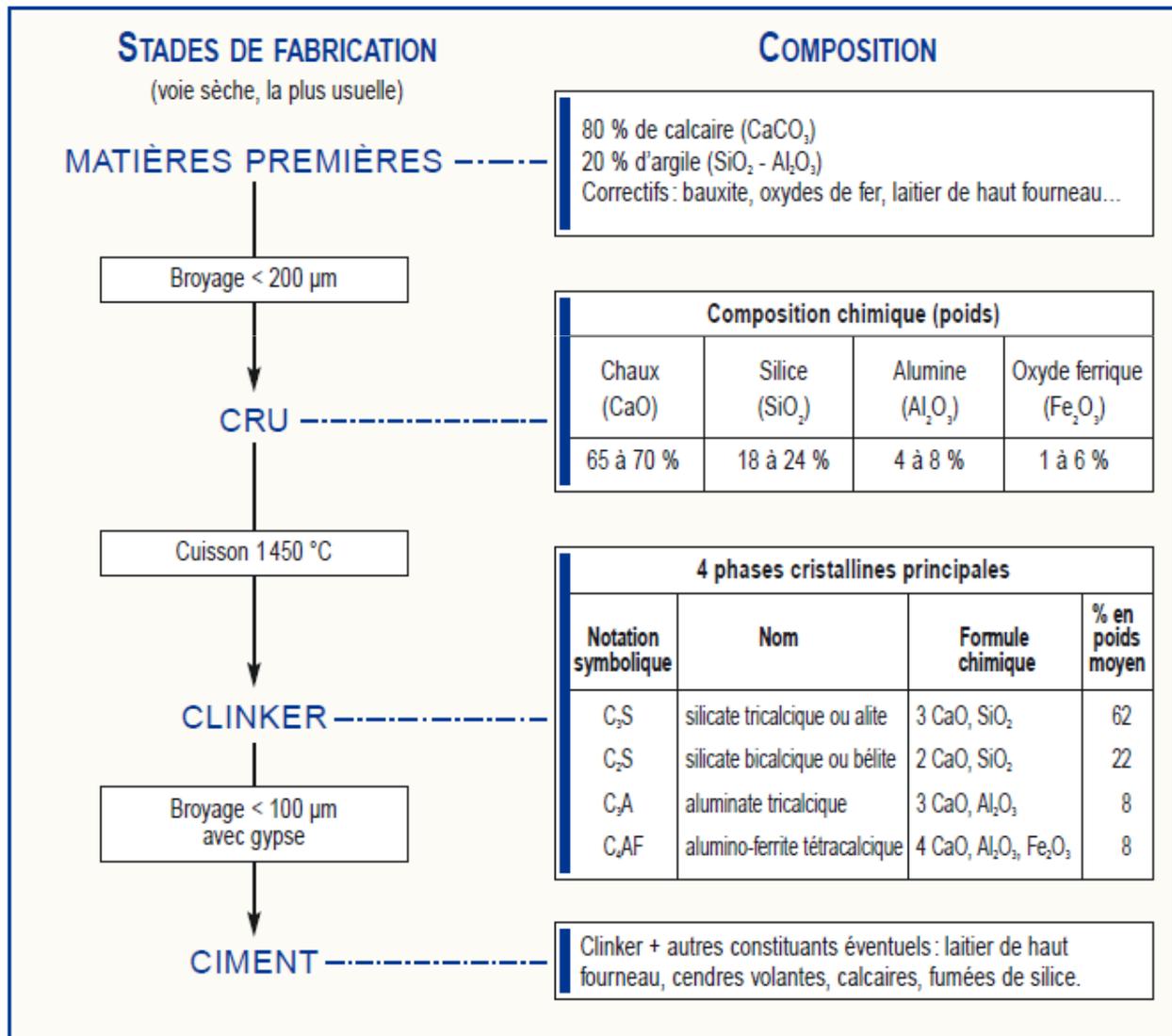


Figure I.2 : Les étapes de fabrication du ciment [13].

I.4. Les constituants du ciment :

I.4.1. Les Constituants principaux :

I.4.1.1. Le clinker et sa composition chimique :

Le clinker est le principal constituant des ciments courants. Il est défini comme un liant hydraulique capable de lier, en présence d'eau. [14]. Le clinker est obtenu à la suite de réactions chimiques par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkérisation) vers 1450°C des matières premières constituées essentiellement de calcaire (80%), d'argile (20%) [15]. Ces matières premières contiennent la chaux (CaO), l'alumine (Al_2O_3), la silice (SiO_2) et le fer (Fe_2O_3). [16]



Figure I.3 : Le clinker

Dans le four, le mélange cru après séchage et décarbonatation arrive sous la forme de poudre ou de petits granules ayant un diamètre de 3 à 25 mm dans la zone de cuisson. Les réactions chimiques commencent sous l'effet de la température. L'oxyde de fer se combine à l'oxyde d'aluminium et à l'oxyde de calcium pour former l'aluminoferrite tétracalcique (C_4AF). L'alumine restante réagit avec de l'oxyde de calcium pour former l'aluminate tricalcique (C_3A). Ces 2 composants forment la phase liquide.

Les oxydes de silicium et de calcium réagissent ensemble pour former le silicate bicalcique (C_2S) qui, lui-même, se transforme en silicate tricalcique tant qu'il reste de l'oxyde de calcium non combiné. A la sortie du four, l'oxyde de calcium non combiné s'appelle chaux libre. [17]

Les processus de fabrication du ciment et les réactions chimiques en fonction de la température sont représentés dans le tableau I.1

Tableau I.1 : Processus de fabrication du ciment [18]

Température (°C)	Procédé	Réaction chimique
20 → 200	Séchage	$H_2O \uparrow$
200 → 450	Élimination de l'eau interstitielle	$H_2O \uparrow$
450 → 600	Décomposition des argiles, formation des Meta-Kaolinite	$Al_4(OH)_8Si_4O_{10} \rightarrow 2(Al_2O_3, 2SiO_2) + 4H_2O$
600 → 950	Décomposition des Meta-Kaolinite	$Al_2O_3, 2SiO_2 \rightarrow Al_2O_3 + 2SiO_2$
800 → 1000	Décarbonatation du calcaire Formation de silicate Monocalcique CS Formation de l'aluminate plus riche en chaux	$C_aCO_3 \rightarrow C_aO + CO_2$ $3C_aO + 2SiO_2 + Al_2O_3 \rightarrow 2(C_aO, SiO_3) + C_aO, Al_2O_3$
1000 → 1300	De 950 à 1200° : formation de Silicate bicalcique, C2S De 1200 à 1300 : formation d'aluminate tricalcique et différent aluminate tétracalcique C3A, C4AF	$C_aO, Al_2O_3 + 3C_aO + Fe_2O_3 \rightarrow 4C_aO, Al_2O_3, Fe_2O_3$ $C_aO, SiO_2 + C_aO \rightarrow 2C_aO, SiO_2$ $C_aO, Al_2O_3 + 2C_aO \rightarrow 3C_aO, Al_2O_3$
1250	Formation de la première phase liquide	
1300 → 1450	Formation de silicate tricalcique par réaction C3S ce qui entraîne une disparition progressive de chaux libre CaO	$3C_aO, SiO_2 + C_aO \rightarrow 3C_aO, SiO_2$

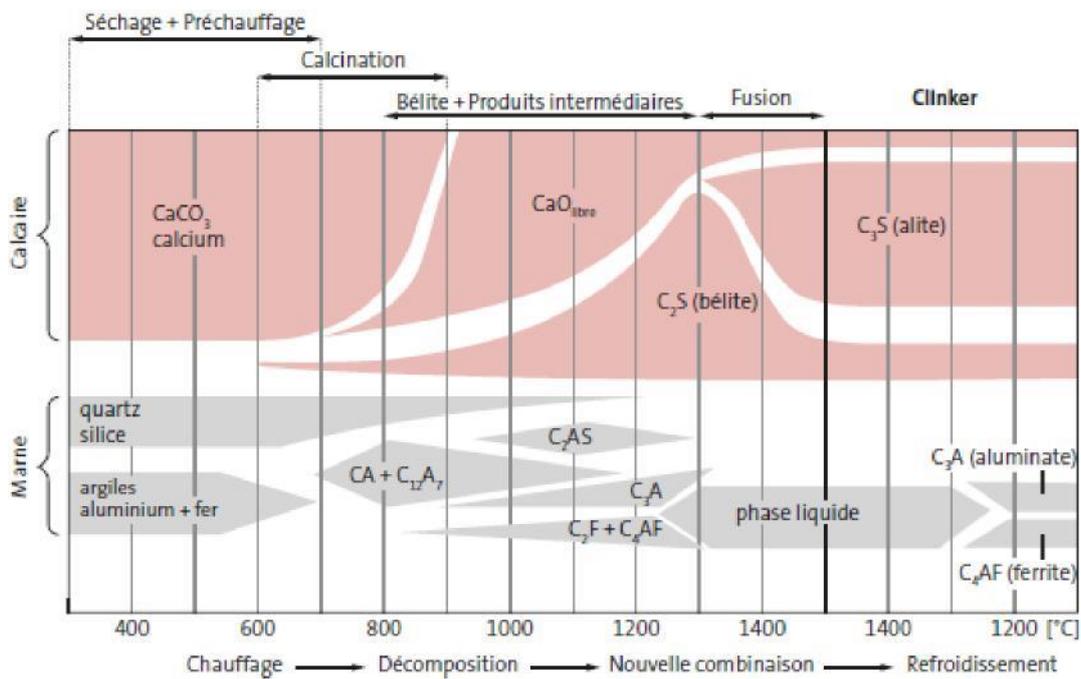


Figure I.4 : Formation des minéraux du clinker [19]

I.4.1.2. Le gypse :

Le gypse est une roche minéral blanche, d'aspect mat, finement cristallin, tendre (rayable à l'ongle) et de densité 2.3. Quelques traces jaunes de soufre peuvent apparaître. Il est constitué en majeure partie de sulfate de calcium hydraté (CaSO₄, 2(H₂O)). Il est très pur (souvent 98%) et ne nécessite pas de purification lors de son exploitation.

Le gypse est la matière première utilisée pour la fabrication de ciment dans le but de régulariser la prise du ciment, notamment les ciments qui contiennent des proportions importantes d'aluminate tricalcique (Al₂O₃) [20].



Figure I.5 : Le gypse

I.4.2. Les constituants alternatifs :**I.4.2.1. Les fillers calcaires (matériaux inertes) :**

Les fillers calcaires sont des poudres fines obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, cendres volantes, bentonite), ils sont inertes donc ils ont aucun effet lors de l'hydratation du ciment. Les fillers se différencient les uns des autres par : leur origine, finesse, composition chimique, dureté... [21].

Le filler calcaire a pour effet de remplir les vides entre les grains de taille supérieure du ciment avec l'existence d'un pourcentage optimal : trop peu de filler ne comble pas assez les vides, et une quantité trop importante désorganise la structure.[22] Il y a donc une optimisation possible du squelette granulaire, qui permet ainsi une diminution de la demande en eau du matériau [23].

I.4.2.2. Les pouzzolanes :**I.4.2.2.1. Historique :**

Le terme pouzzolane désigne à l'origine un matériau naturel ou artificiel constitué de projections volcanique. Son nom provient de la ville Pouzzoles située à 27 km du Vésuve (Italie) ou des cendres volcaniques cinérites trachytique altérés en tufs zéolitique ont été exploitées de manières quasi industrielles par les romains en tant que matériau vertu hydraulique [24].

Les grecs et les romains avaient remarqué que les matériaux de dépôts volcaniques, lorsqu'ils sont moulus et mélangés avec de la chaux, donnent un mortier avec une bonne tenue à l'action de l'eau et une résistance mécanique très élevée [25].

I.4.2.2.2. Définitions :

Les pouzzolanes sont des matériaux volcaniques cendreux, de couleur noire ou rouge avec toutes les teintes intermédiaires comme le gris clair et friable, elles exploitées pour la production de mortier et des ciments composés. Ceux sont des matériaux riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes [26]. Donc les pouzzolanes ne possèdent pas en elles-mêmes des propriétés liantes mais qui sous forme finement broyées en présence d'humidité réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes. [27].

Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolanique sont divers. Ils participent à l'amélioration de la résistance et la durabilité de ciment, comme elles permettent la réduction de la quantité de clinker qui a des émissions importantes du CO₂, en remplaçant une partie de ce clinker avec les pouzzolanes et réduire la consommation d'énergie [25].

Les matériaux Pouzzolanique sont devisés en deux grandes catégories : les pouzzolanes **naturelles** et les pouzzolanes **artificielles** telle que le montre la figure I.6 :

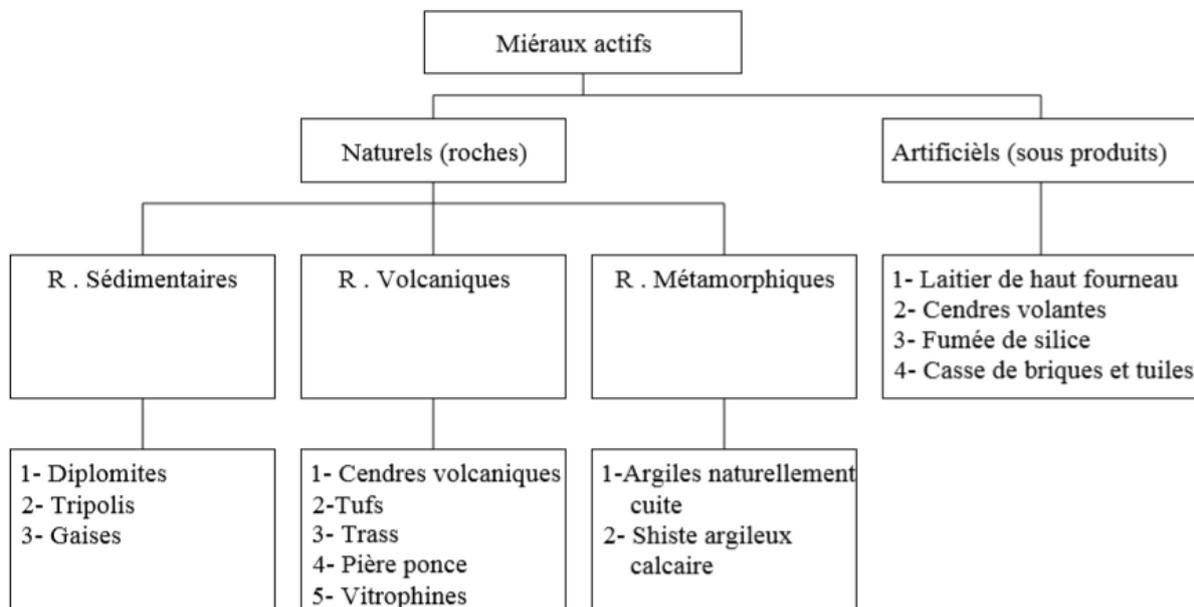


Figure I.6 : Origine des matériaux pouzzolanique [25]

I.4.2.2.3. Les types de pouzzolanes :

a) Les pouzzolanes naturelles :

Les pouzzolanes naturelles désignent au sens strict les **pyroclastites** ou **pyroclastiques** qui veut dire « *brisé par le feu* » [26], qui est une roche naturelle correspondant à des projections volcaniques, scoriacées, essentiellement stromboliennes et basiques, c'est-à-dire d'une composition basaltique, sa couleur varie généralement du noir au rouge selon le degré d'oxydation du fer, présent respectivement sous forme de magnétique ou d'hématite. [27]. Les pouzzolanes naturelles sont des produits essentiellement composés de silice SiO₂, d'alumine Al₂O₃ et d'oxyde de fer Fe²⁺, présentant des propriétés pouzzolanique [11],

On peut citer comme exemples :

- **Le tuf :**

Selon le dictionnaire de l'académie française le mot tuf se définit comme : « substance pierreuse formée soit par des dépôts calcaires, soit par des cendres, des boues ou des débris volcaniques » [29],

C'est un produit composé de la silice, l'alumine et l'oxyde de fer qui présentent naturellement des propriétés pouzzolaniques. Ils se forment dans l'eau de chaux c'est-à-dire en présence d'eau et d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) de composés silicates ou d'aluminates semblables à ceux formés lors du durcissement des matières hydrauliques (réaction pouzzolanique lente) [30].

En Algérie, le matériau tuf est très abondant (couvrent approximativement une superficie de 300.000 km² durant les années 2008 et 2009), bien réparti géographiquement et d'exploitation facile. La production de tuf durant ces deux années a atteint un niveau exceptionnel, de 12,2 millions m³, 7,5 millions m³, respectivement (Direction générale des mines, 2009). L'Algérie compte 50 carrières de production de tuf en activité, recensée en 2008[31].

- **Les schistes calcinés :**

Le schiste bitumineux est une sédimentaire, qui contient des composants organiques combustibles, Les schistes calcinés sont produits dans un four spécial à une température d'environ 800 °C [19]. Les schistes calcinés contiennent principalement du silicate bicalcique (C2S) et de l'aluminate Monocalcique (CA), de même que des petites quantités de chaux libre CaO et de sulfate de calcium, ainsi que SiO₂, qui réagissent de façon pouzzolanique. Ainsi, les schistes calcinés finement broyés ont de fortes propriétés hydrauliques, (comme le ciment Portland) couplées à des propriétés pouzzolaniques [32].

b) Les pouzzolanes artificielles :

Les pouzzolanes artificielles sont composées essentiellement de la silice, l'alumine et le fer [24]. Ce sont des matériaux fins ou broyés ayant subis un traitement thermique spécifique (750-850°C) éliminant l'eau libre et pour leurs assurer des propriétés pouzzolanique [23].

Ils sont des déchets des différentes industries, on distingue : [24].

-des résidus de fabrication industrielle.

-des débris de brique et tuile fabriquées avec des argiles pures à des températures élevées

Comme exemples, on cite :

- **Laitier granulé de haut fourneau (S) :**

Le laitier granulé de haut fourneau est obtenu par refroidissement rapide du laitier fondu de composition adaptée provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau ; il contient au moins deux tiers en masse de laitier vitreux et présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable.

Le laitier granulé de haut fourneau doit être constitué d'au moins deux tiers en masse de la somme de l'oxyde de calcium (CaO), de l'oxyde de magnésium (MgO) et du dioxyde de silicium (SiO₂). La partie restante contient de l'oxyde d'aluminium (Al₂O₃) ainsi que de faibles quantités d'autres composants. Le rapport massique (CaO + MgO) / (SiO₂) doit être supérieur à 1 [5].

- **Les cendres volantes :**

Les cendres volantes sont des poudres fines constituées principalement de particules vitreuses de forme sphérique, dérivées de la combustion du charbon pulvérisé [33]. Leurs compositions dépendent de leurs origines et impliquent des propriétés différentes. Les cendres calciques possèdent des propriétés hydrauliques et les cendres siliceuses possèdent des propriétés pouzzolaniques. Elles sont classées en différentes catégories selon la norme considérée [34].

Le rôle des cendres volantes dans le mélange est de ralentir la vitesse de libération de la chaleur d'hydratation du fait de la dilution du ciment dans la pâte cimentaire. En plus, la réaction pouzzolanique se déroule très lentement. [36].

- **Fumée de silice :**

Les fumées des silices sont des particules très fines (environ 1 μm) [11] provient de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours en arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliage et de Ferrosilicium ; elle est formée de particules sphériques contenant au moins 85% en masse en silice amorphe [5].

La finesse et la forme vitreuse des fumées de silice font d'elle un produit très réactif, les microparticules de la fumée de silice peuvent diminuer l'espace vide entre les particules du ciment, ce qui provoque la diminution du rapport du mélange entre l'eau et le ciment (E/C) [36].

I.4.2.2.4. Les propriétés chimique et physique de la pouzzolane :

Les paramètres principaux qui conditionnent la réactivité des matériaux pouzzolanique

Sont [37] :

- la composition chimique (silice et l'alumine avec un grand pourcentage).
- le degré de vitrosité (les éléments vitreux sont immédiatement disponibles lors de la solubilité).
- la finesse (améliorer par le broyage).

L'activité pouzzolanique dépend à court terme de la surface spécifique du matériau, et de sa teneur en silice et alumine à long terme

I.5. Les types de ciment [6] :

Il existe plusieurs types de ciment suivant la présence ou non d'un matériau de substitution du clinker et la nature de ce substituant.

a) CEM I :

Le ciment CEM I également appelé ciment portland, contient au minimum 95% de clinker et au maximum 5% de constituants secondaires (le gypse).

b) CEM II :

Les ciments CEM II (A ou B), contiennent au minimum 65% de clinker et au maximum 35% d'autres constituants comme le laitier de haut-fourneau, «la fumée de silice » (limitée à 10%), la pouzzolane naturelle, les cendres volantes, les calcaires, ...etc. Les ciments CEM II sont bien adaptés pour les travaux massifs.

c) CEM III :

Les CEM III A, B ou C également appelé ciment de haut-fourneau, sont principalement obtenus grâce au mélange de 5 à 64% de clinker avec 35 à 95% de laitier de haut-fourneau.

d) CEM IV :

Les CEM IV A ou B sont des ciments de type pouzzolanique. Ils sont constitués de 45 à 89% de clinker et de 10 à 55 % d'autres constituants comme le laitier de haut-fourneau, «la fumée de silice », le schiste calciné, la pouzzolane naturelle, les cendres volantes, les calcaires, ...etc.

e) CEM V

Les CEM V A ou B sont des ciments qui contiennent entre 20 et 64 % de clinker, 18 à 50% de laitier de haut-fourneau et 18 à 50 % de cendres volantes siliceuse et /ou de

pouzzolanes. Ces ciments sont bien adaptés aux travaux hydrauliques, souterrains, fondations et injections par exemple.

Tableau I.2 : les différents types de ciment courants [38]

désignations	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en% de l'un de constituants suivant : laitier-pouzzolanes-cendres-calcaires-schistes-fumées de silice	Teneur en constituants secondaires (filler)
C P A- CEM I	Ciment portland	95à100%		0 à 5%
C PJ-CEM II/A	Ciment portland Composé	80à 94%	-de 6à20% de l'un quelconque des constituants, sauf dans les cas ou les constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10% -de 21à35%avec les mêmes restrictions que ci-dessus	0à5%
CPJ-CEMII/B		65 à79%		0à5%
CHF-CEM III/A	Ciment de haut-fourneau	35à64%	-35à65% de laitier de haut-fourneau	0à5%
CHF-CEM III/B		20à34%	-66à80% de laitier de haut-fourneau	0 à5%
CLK-CEMIII/C		5à19%	-81 à95% de laitier de haut-fourneau	0à5%
CPZ-CEMIV/A	ciment pouzzolanique	65 à90%	-10à35%de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à10%. -36à55%comme ci-dessus	0à5%
CPZ-CEMIV/B		45à64%		0à5%
CLC-CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40à64%	-18à30% de laitier de haut-fourneau et 18 à30% de cendres siliceuses ou de pouzzolanes. -31 à50%de chacun des 2 constituants comme ci-dessus	0à5%
CLC-CEM V/B		20à39%		0à5%

I.6. L’hydratation du ciment :

L’hydratation désigne l’ensemble des réactions chimiques qui se produisent entre les constituants du ciment et l’eau [39]. Lors de l’hydratation du ciment, les minéraux de clinker (phase anhydre : C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF) se transforment en phases hydratées (**CSH**, **CH**, **AFm** et **Aft...**) [40]. Dans L’hydratation du ciment, chaque phase minéralogique réagit à sa propre manière avec sa propre cinétique du fait de son caractère exothermique [41].

Elle peut être synthétisée comme suit [40]

Anhydres + eau (H₂O) →hydrates

C₃S (silicates tricalcique) + H₂O }
 C₂S (Silicates bicalcique) + H₂O } → { CSH (silicates de calcium hydratés)
 CH (Portlandite)

C₃A (Aluminates tricalcique) + H₂O }
 C₄AF (Aluminoferrite tétracalcique) + H₂O } → { AFm(monosulfoaluminate de calcium)
 AFt(trisulfoaluminate de calcium)

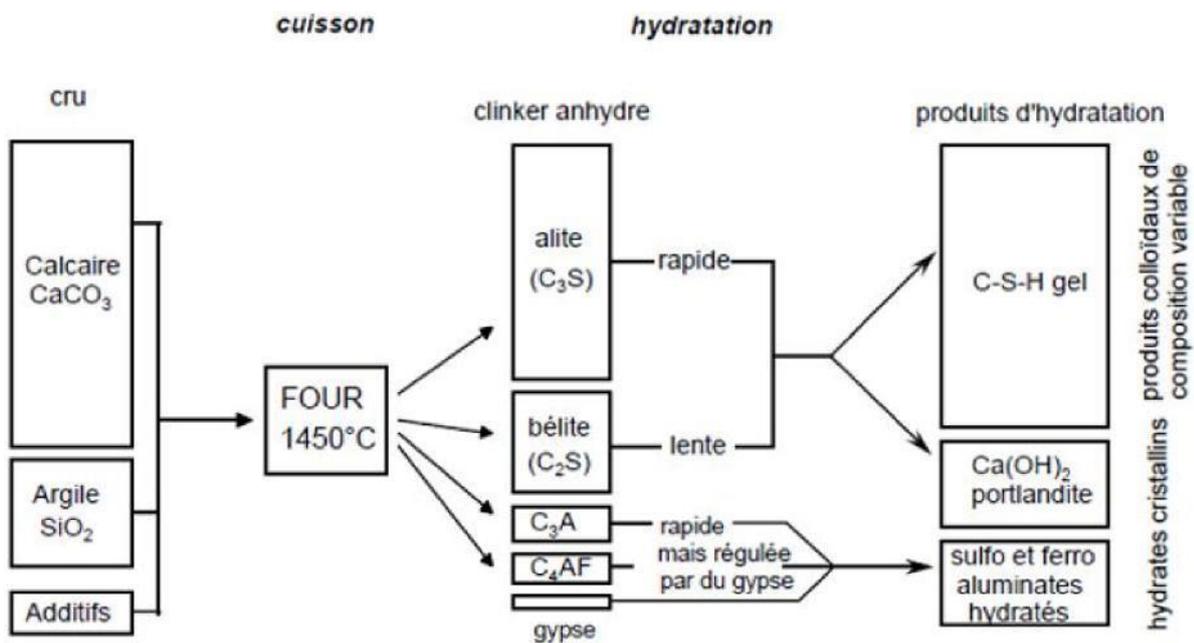


Figure I.7 : Le ciment Portland, du cru au ciment hydraté, l'alite est le composé majoritaire du clinker [7]

L'hydratation et sa cinétique dans les bétons sont influencées par de nombreux facteurs, on cite quelques facteurs : [42]

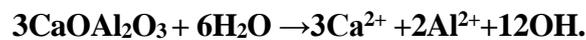
- de la température de ciment et de la température ambiante.
- de la nature de la finesse du ciment.
- le rapport E/C.
- de la nature des adjuvants et de leur dosage.

I.6.1. Hydratation des Aluminates tricalcique C₃A ou 3CaO.Al₂O₃ :

Les aluminates tricalcique **C₃A (célite)** : sont constituées de 5 à 10% de la composition du clinker de ciment [19]. Le comportement rhéologique du ciment est influencé en fonction de l'hydratation des aluminates tricalcique **C₃A**, sachant que l'hydratation se passe rapidement en ajoutant du gypse qui joue le rôle de régulateur de prise [43].

L'Hydratation des aluminates tricalcique s'effectue avec une chaleur d'hydratation élevée, elles contribuent à la résistance à court terme et aussi elles augmentent le retrait et réagissent avec les sulfates [19].

Après contact avec l'eau, l'hydrolyse et la dissolution de l'aluminate tricalcique donnent [14] :



Les aluminates C₃A tricalcique réagit selon une réaction auto catalytique rapide conduisent à la formation des aluminates hydrates : C₄AH₁₃.C₂AH₈ qui se recombinent en C₃AH₆, forme la plus stable à température ambiante en présence de l'eau, tel qu'il est mentionné dans la réaction suivante : [44]



a) La phase initiale

Le C₃A et le gypse se dissolvent selon une réaction exothermique aboutissant à une solution sursaturée par rapport aux hydrates. Les ions se recombinent alors quasi instantanément en cristaux de trisulfoaluminate de calcium hydraté appelés « ettringite ».

- **Dissolution du C₃A et du gypse**



Et



- **Précipitation de l'ettringite**



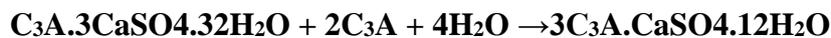
L'ettringite, ainsi formée, précipite à la surface des grains de C₃A évitant l'hydratation rapide de ces derniers en C_xAH_y à l'origine du phénomène de prise rapide. Dans les pâtes de ciment, l'ettringite se présente généralement sous forme de fines aiguilles enchevêtrées [45].

b) Phase dormante :

Le C₃A présente une phase dormante au cours de laquelle l'ettringite continue à se former à faible vitesse [16].

-Epuisement du gypse

Lorsque le «gypse » est totalement consommé, généralement 10 à 24 heures après le gâchage, l'ettringite se dissout et devient une nouvelle source d'ion sulfate pour former avec les aluminates excédentaires du monosulfoaluminate de calcium hydraté :



Ce dernier cristallise sous forme de cristaux en tablettes hexagonales, comme les hydrates hexagonaux C₄AH₁₃ et C₂AH₈ [16].

c) Phase finale

Cette phase dépend des proportions initiales d'aluminate et de « gypse ». Après quelques semaines, l'ettringite est totalement transformée en monosulfoaluminate et le produit final de l'hydratation du C₃A est une solution solide de MSA-C₄AH₁₃[16].

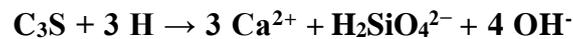
I.6.2. Hydratation d'Aluminoferrite de calcium C₄AF :

Les Aluminoferrite de calcium sont constitués de 5 à 10% du clinker de ciment. L'hydratation des aluminates tétracalciques (C₄AF) conduit à la précipitation des mêmes types de composés induit par la dissolution du C₃A, seulement la réaction du C₄AF est très lente et sa résistance mécanique est faible [19]. En substituant aux aluminates des aluminoferrites en présence d'hydroxyde de calcium, une partie des ions Al³⁺ est substituée par des ions Fe³⁺. Dans le cas contraire, une partie importante du fer précipite sous forme d'oxyde de fer, Fe(OH)₃ [14,43] :

**I.6.3. Hydratation de C₃S :**

Le terme de C₃S est réservé au silicate tricalcique **pur** que les cimentiers le désignent par le **mot alite**, qui est constitué principalement de 50 à 70% du clinker de ciment, l'hydratation se passe rapidement avec l'élévation de la chaleur d'hydratation et la résistance court terme. [19].

En contact avec l'eau les silicates tricalciques se dissolvent sous forme d'ions selon les réactions suivantes : [46]

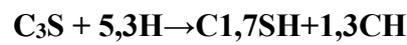


La solution devient rapidement sursaturée par rapport à un hydrate moins soluble, l'hydrosilicate de calcium ou les C-S-H (silicates de calcium hydratés). L'équation bilan de précipitation est : [14]



En solution, le C3S se dissout, libérant des ions calcium et hydroxyde ainsi que du silicium [47]. La stœchiométrie des silicates de calcium hydratés est souvent déterminée par le rapport molaire C/S qui varie de 1 à 2 pour que la réaction soit en équilibre. [14]. On retient un rapport C/S (x) proche de 1,7 pour un ciment Portland [41]. Cette réaction, limitée par le silicium, ne consomme pas tous les ions de calcium en solution. Une fois la limite de solubilité de l'hydroxyde de calcium atteinte, ce dernier précipite sous la forme de portlandite [47].

F. Young propose l'équation de l'hydratation du C₃S suivante : [48]



a) Phase pré-dormante :

C'est la réaction instantanée et exothermique du C₃S avec l'eau. En quelques secondes, la solution est sursaturée par rapport aux C-S-H et la teneur en ions silicates atteint son maximum. On assiste à une compétition entre les germinations des C-S-H et du Ca(OH)₂. Tant que la teneur en ions silicate de la solution dépasse une certaine valeur limite, la germination des C-S-H l'emporte [48].

b) Période dormante :

Dans cette période, le dégagement de chaleur est faible et aucune évolution de la pâte ne semble se produire.

Les réactions précédentes se poursuivent pendant quelques heures à vitesse décroissante par suite du PH élevé et de la forte concentration en calcium. La quantité des C-S-H formée est très faible, de même que la consommation en eau. Le « gâchage chimique » selon les termes de Christian Vernet, déclenche une nouvelle formation rapide des C-S-H, caractérisée par une diminution des ions Ca²⁺ et OH⁻ ainsi que par l'augmentation du flux thermique. Ces phénomènes marquent la fin de la période dormante [16].

c) Période de prise

Pendant cette période, l'essentiel des propriétés du ciment durci (stabilité de volume, durabilité) se forme. L'atteinte de ces propriétés est due à la formation d'une grande quantité de C-S-H en un réseau rigide. Les fibres de C-S-H et les cristaux de portlandite s'enchevêtrent et remplissent les pores [16].

d) Période de durcissement :

La réaction d'hydratation du C₃S se poursuit lentement tant qu'il subsiste de l'eau dans les pores capillaires de la pâte durcie [16]. La couche d'hydrates formée ne permet pas de réaction d'hydratation par diffusion [49]. L'hydratation totale du C₃S peut prendre entre plusieurs mois à plusieurs années [16].

I.6.4. Hydratation de silicate bicalcique(C₂S) :

Les cimentiers le désignent par le nom **bélite** qui constitue entre 15 et 30% du clinker de ciment **CEMI**. La bélite donne au ciment sa résistance à long terme dans la chaleur de l'hydratation faible et lente [19].

Les silicates bicalciques (C₂S) s'hydratent d'une manière identique à C₃S telle que la dissolution du C₂S conduit également à la précipitation de C-S-H et de Portlandite [47]. La quantité de calcium engagée dans les réactions est moins importante [46] ce qui conduit à l'équation simplifiée d'hydratation [41] :

**I.7. Les propriétés des produits d'hydratation :****I.7.1. Les silicates de calcium hydratés C-S-H :**

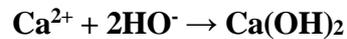
Les silicates de calcium hydratés (désignés par C – S – H), issus de l'hydratation des phases alite(C₃S) et bélite(C₂S), elles constituent la partie majeure de la phase liante du ciment (50 à 60%) des hydrates formés dans un ciment Portland. Le terme C – S – H désigne une famille de silicates de calcium, mal structurés et de stœchiométrie variable, ce qui la distingue dans la pâte de ciment par rapport aux autres hydrates, cristallins, tels que la portlandite. Dans une pâte de ciment, les C – S – H ont une structure fibreuse [48].

I.7.2. La portlandite :

La portlandite est un composé cristallin, de forme hexagonale et de formule chimique Ca(OH)₂. Elle se forme par précipitation dans l'espace poreux de la pâte de ciment. Au cours de l'hydratation, les cristaux de portlandite croissent, rejoignent les grains de ciment recouverts de

gel de C – S – H et forment ainsi des ponts d'hydrates, facilitant la percolation des phases solides à court terme [48].

La dissolution de la portlandite dans l'eau est exothermique (Taylor 1997), cet équilibre s'écrit de la manière suivante [47] :



La solubilité de la portlandite dans l'eau d'ordre de 22mmol/l à 25°C, ce qui correspond à un pH de 12,6. La portlandite est une phase la plus soluble de la pâte de ciment hydratée, pour maintenir son équilibre de solubilité et le pH élevé de la solution interstitielle [50].

I.7.3. Ettringite :

C'est Les composés de type **AFt** ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-tri}$) qui désignent une famille de phases minérales de même structure cristalline, dont le représentant le plus important est l'ettringite, aussi nommée trisulfoaluminate, de formule chimique $\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{32}$. Sa structure cristalline est constituée de colonnes hexagonales de cations entre lesquelles les ions sulfates assurent l'électroneutralité [47].

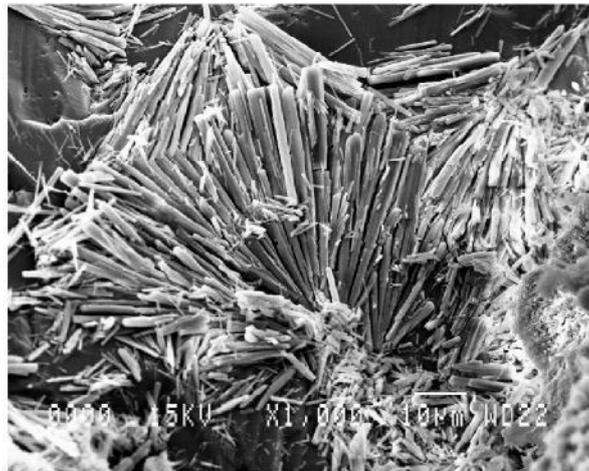


Figure I.8 : Ettringite

I.7.4. Le monosulfoaluminate de calcium hydraté :

Les phases **AFm** ou aluminat ferrite monosubstitué ont pour formule générale $[\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe})(\text{OH})_6\text{H}_2\text{O}]$, il se présente sous la forme de fines plaquettes hexagonales dérivant de celle de la portlandite dans laquelle un ion Ca^{2+} sur trois est substitué par un ion Al^{3+} ou Fe^{3+} [51].

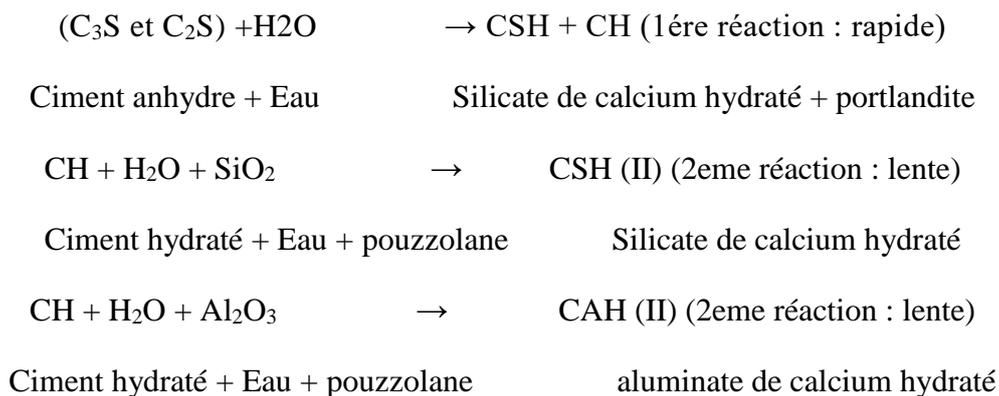
I.8. Mécanisme de la réaction pouzzolanique :

Le comportement du ciment avec l'ajout pouzzolanique est déterminé par les caractéristiques suivantes : [52].

- La réaction est lente, le dégagement de chaleur et le développement des résistances seront également lents.
- La réaction pouzzolanique améliore la résistance du ciment en milieu acide.
- Augmentation de la résistance et l'imperméabilité des ciments par le remplissage des pores capillaires

La réaction pouzzolanique se produit par la consommation de la portlandite, la silice (SiO₂) permet une réduction de la teneur en Ca(OH)₂ et par conséquent l'augmentation de la résistance du mélange. [53].

Les réactions d'hydratation du ciment et des pouzzolanes donnent [54] :



Au cours de l'hydratation du ciment Portland il se forme sur chacun des grains une couche de produits d'hydratation, principalement du C-S-H, qui devient de plus en plus épaisse, alors que l'hydroxyde de calcium également formé se sépare partiellement de la solution interstitielle sous forme de cristaux hexagonaux en paillettes. Ces derniers réagissent à leur tour avec la silice et/ou l'alumine de la pouzzolane pour former des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et/ou d'aluminates de calcium hydratés (C-A-H). [25].

En raison de la teneur de l'effet pouzzolanique, le taux d'accroissement de la résistance ainsi que la chaleur d'hydratation liés à cette réaction se révèlent faible. En revanche, l'hydratation de C₃S dans le ciment portland est rapide de sorte que le taux d'accroissement de la résistance et la chaleur d'hydratation y' affèrent sont élevés. Il convient aussi de noter que l'effet pouzzolanique donne lieu à une consommation de la chaux, alors que l'hydratation constitue une réaction donnant lieu à une production de la chaux. [55]

I.8.1. Chaleur d'hydratation :

Le ciment à la pouzzolane a un développement de chaleur lent sous les conditions adiabatiques que le ciment portland, ce qui est bénéfique pour protéger le jeune ciment de l'apparition des fissures thermiques. [56].

L'addition d'une pouzzolane dans un ciment portland entraîne une nette diminution de la chaleur d'hydratation. [55]

I.9 L'impact environnemental de la production de ciment :

Dans le domaine du génie civil, le ciment est le matériau le plus utilisé pour la construction au niveau mondiale, ce matériau pose des problèmes en termes de respect de l'environnement vu ses émissions énormes de CO₂ dû à la fabrication de ciment : [56]

- L'acheminement (transport en camion ou train des matières premières).
- La confection (mazout ou autre combustible)
- La consommation électrique

Ces émissions de CO₂ sont obtenues à partir de la clinkérisation à haute température(1450°C) des matières premières comme le calcaire qui contient du fameux carbonate de calcium CaCO₃, dont la réaction chimique ci-dessous :



La quantité de CO₂ émise lors de la fabrication du ciment correspond en moyenne mondiale à 810 kg de CO₂ émis par tonne de clinker [57].

I.10 Solution intervenant à l'impact environnemental :

Les scientifiques et les chercheurs dans le domaine du ciment se mobilisent déjà depuis quelques années pour trouver des solutions plus durables pour la fabrication du ciment pour éviter les agressions provenant de l'environnement.

Par conséquent, le ciment est le paramètre clé pour réduire les émissions de CO₂, donc des solutions sont proposés comme :

- Amélioration des nouveaux processus pour la fabrication de ciment.
- En ajoutant des additions minérales au clinker : fillers calcaires, ajouts pouzzolaniques (fumées de silice, cendres volantes, schistes calcinés) ou ajouts potentiellement hydrauliques (laitiers de haut-fourneau), les différents types de ciment sont obtenus. En moyenne, ces ciments avec ajouts pourraient réduire les émissions mondiales dues au clinker d'environ 21 % [57].

Dans notre mémoire, on s'intéresse à la deuxième solution qui est la substitution d'une partie de ciment avec la pouzzolane naturelle (le tuf), donc la réduction du dosage en clinker du ciment. L'intérêt de cette substitution est tout d'abord un intérêt économique puisque ces additions nécessitent peu d'énergies pour être produites et un intérêt environnemental avec le dégagement minimal de CO₂.

I.11. L'intérêt de l'utilisation de la pouzzolane :

a) Intérêt de points de vue écologiques et environnementaux :

Selon certaines études, la fabrication d'une tonne de ciment génère environ une tonne de CO₂. Il est responsable d'environ 5% des émissions de ce gaz sur la planète. Cette situation doit être prise au sérieux car le béton est appelé à jouer un rôle de plus en plus important dans le développement et le maintien de l'activité humaine.

Le remplacement partiel du ciment par les ressources naturelles telles que les pouzzolanes, permet de réduire les émissions des gaz, par la fabrication d'un ciment non polluant [58].

b) Intérêt du point de vue économique :

L'introduction des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique car la consommation en clinker qui dépense une quantité très importante d'énergie baisse en fonction des taux d'ajouts, ce qui amène à la réduction de l'énergie consommée [59].

Dans les pouzzolanes naturelles, il n'est pas nécessaire de les pulvériser ou de les soumettre à un traitement thermique avant de s'en servir. C'est pour cela que plusieurs pays comme les romains les utilisent pour fabriquer des ciments Portland composés [60].

c) Intérêt du point de vue technique :

L'intérêt technique des ajouts réside en premier lieu dans le fait qu'ils permettent l'obtention d'un ciment dont les performances sont aussi bonnes que celles d'un CEMI (ciment Portland). En second lieu, les ciments composés (CEMI+ ajouts) présentent souvent l'avantage sur le CPA, d'une meilleure résistance aux agressions chimiques [61].

I.12. Les inconvénients de l'utilisation de la pouzzolane :

Par les inconvénients majeurs on cite les suivants [62] :

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

I.13. L'utilisation des ajouts en Algérie

L'industrie cimentaire est d'une importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment, on cite celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El – Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni – Saf [63].

Le tableau I.3 donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes

Tableau I.3 : Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [63]

Entreprise	Cimenterie	Ajouts Utilisés
ERCE	Ain Touta	Pouzzolane
	Ain El Kebira	
	Hamma Bouziane	
	H'djar Essaoud	Laitier
	Tebessa	
ERCC	Meftah	Tuf / Calcaire
	Raïss Hamidou	Poussière
	Sour EL Ghozlane	Calcaire/Tuf
ECDE	Chlef	Calcaire
ERCO	Beni Saf	Pouzzolane
	Zahana	
	Saida	

I.14. Etat de l'art sur utilisation de la pouzzolane naturelle :

D'après le travail de M. ROUIBI qui consiste à étudier la durabilité des mortiers à base de la pouzzolane naturelle, confectionnés avec deux sables de natures différentes (sable calcaire, sable siliceux). Les mortiers sont conservés dans deux milieux différents, l'eau distillée et une solution sulfatique (5 % $MgSO_4$). La durabilité des mortiers après 270 jours de conservation, est quantifiée par l'évolution de la résistance mécanique (résistance à la compression), par la variation de la masse.

La confection des mortiers, est effectuée conformément à la norme (EN 196-1., 2006), avec l'utilisation d'un ciment Portland CEM I et trois combinaisons de liants obtenus suite au remplacement partiel en poids du ciment par différentes proportions de la pouzzolane naturelle (10%, 20% et 30%). Des échantillons prismatiques, sont conservés dans une salle humide pendant 24 heures. Après le démoulage, elles sont immergées dans une eau saturée en chaux pendant 27 jours. Après cette durée de cure, une série d'éprouvettes est conservée dans l'eau distillée et une autre dans la solution sulfatique (5% $MgSO_4$), qui a été préparée selon les normes (ASTM 1012., 2004) et (NF P 18-837.,1993).

D'après l'analyse des résultats, ils ont remarqué l'augmentation de la résistance avant sa chute, à un certain âge de conservation dans la solution de sulfate ($Mg SO_4$), est justifiée par la formation des produits expansifs tels que le gypse, l'ettringite et la brucite. La perte de résistance est la conséquence de la microfissuration engendrée par ces produits expansifs à long terme. La résistance à la compression du mortier témoin (sans ajout) est supérieure à celles des mortiers à base de pouzzolane naturelle pour les deux mortiers formulés avec le sable calcaire et le sable siliceux, respectivement. La chute de résistance à la compression de ces derniers, est proportionnelle au pourcentage d'ajout. Cette chute est due à la pauvreté en portlandite consommée par la réaction pouzzolanique.

Ils ont remarqué L'évolution de la masse dans les deux mortiers, est traduite par la progression de la formation des hydrates dans la solution eau distillée, et elle est expliquée par le gonflement dû à la formation des produits expansifs comme la brucite, le gypse et l'ettringite, dans la solution sulfatique. Dans la solution sulfatique (5% $MgSO_4$) cette différence de gain de masse est due à la variation de la quantité de portlandite. Elle se dissout dans le cas de sable siliceux et elle est piégée sous forme de brucite, dans le cas de sable calcaire.

Ils ont constaté que la pouzzolane naturelle à un effet néfaste face aux attaques par les sulfates de magnésium, le milieu sulfatique affecte négativement sur les propriétés des matériaux

cimentaire suite à la formation des produits expansifs, tels que le gypse, l'ettringite et la brucite, qui provoquent avec leurs gonflement l'augmentation de la masse des éprouvettes. [64]

D'après le travail de M. Mouli qui consiste en l'étude d'un matériau de construction durable, la pouzzolane naturelle incorporée aux mortiers exposés à une attaque de 5% d'acide sulfurique. La perte de masse, et les dimensions des éprouvettes sont les différents essais réalisés pour étudier la durabilité des mortiers confectionnés à 0, 10, 20 et 30% de pouzzolane.

Ils ont confectionné des éprouvettes de $(5*5*5)$ cm³ selon la NF (196-1) de ciment CPA, et différents pourcentages de pouzzolanes naturelles, les éprouvettes sont démoulées à 24h et conservées à l'eau pendant 28 jours (20 ± 2) C° jusqu'à 28 jours avant l'immersion à l'attaque sulfurique (5% H₂SO₄). Cette opération de mesure de pesées sera effectuée aux échéances 15, 30, 45, 60, 75, 90 et 105 jours.

D'après l'analyse des résultats, ils ont remarqué que tous les mortiers pouzzolaniques sans exception accusent des pertes en masse inférieures à celle du mortier sans pouzzolane M0 et ceci à toutes les échéances de la période d'immersion. On peut affirmer que la pouzzolane naturelle a joué un rôle important pour permettre aux mortiers pouzzolaniques de résister à l'agression de l'acide sulfurique. Donc plus le pourcentage de pouzzolane naturelle est grand plus la résistance du mortier est grande à l'agression acide sulfurique (5% H₂SO₄). La réaction pouzzolanique fixant la chaux, les pores capillaires sont réduits par formation des gels de 2^{ème} génération [CSH], bloquant ainsi l'absorption de la solution acide, d'où une réduction de la perte de masse pour l'ensemble des mortiers pouzzolaniques par rapport au mortier de référence. De plus, la perte de masse observée pour l'ensemble des mortiers pouzzolaniques est due au fait que le ciment, après hydratation, libère une partie considérable d'hydroxyde de calcium libre [Ca(OH)₂] qui peut être lixiviée à l'extérieur quand elle est soumise à l'attaque par l'acide sulfurique [H₂SO₄] en donnant du gypse.

Ils ont constaté que les pertes de volume croissantes et permanentes pour l'ensemble des éprouvettes qui reflètent en premier lieu les résultats de pertes de masse obtenus pour chaque mortier et en second lieu l'effet positive de l'incorporation de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des mortiers vis-à-vis de l'acide sulfurique. C'est le mortier M30 qui affiche les volumes d'éprouvettes les plus grands.

Ils ont conclu que l'ajout pouzzolanique permet de lutter contre la détérioration par les attaques chimiques en apportant les modifications suivantes : réduction de la perméabilité du matériau ; réduction de la taille des pores ; réduction de Ca(OH)₂. La pouzzolane améliore la pénétrabilité du béton et augmente sa résistivité, contribuant ainsi à réduire la vitesse de corrosion.

L'effet bénéfique des matériaux pouzzolaniques est surtout significatif dans les pays chauds, leurs utilisations dans un béton armé sujet à la corrosion est pratiquement nécessaire : dans ces conditions, le ciment Portland ne devrait pas être utilisé seul. [65].

D'après le travail de M. SALHI qui a pour but d'évaluer les effets de l'ajout cimentaire (pouzzolane naturelle) sur la durabilité des bétons dans deux environnements de cure (Eau douce ; Sulfate de magnésium "3% $MgSO_4$ ")

La confection a été faite selon la norme NF 196-1, trois combinaisons ont été préparées à partir du pourcentage optimum d'ajouts, un CEMI, PZ20 (20% pouzzolane), un CRS (ciment résistant au sulfate). Après démoulage, les éprouvettes sont conservées dans l'eau à 20 °C pendant 28 jours avant d'être soumises à l'immersion dans deux environnements de conservation (eau douce, 3% $MgSO_4$), La solution sulfatique est préparée à partir d'eau déminéralisée, à laquelle est ajouté du sulfate de magnésium $MgSO_4$ pour obtenir une concentration en ions sulfates SO_4^{2-} de 30 g/l. La résistance à la compression dans les milieux est mesurée sur des éprouvettes de mortiers contenant trois types de liants (ciment témoin CEMI, PZ20, CRS) les analyses ont été faite en fonction des mois d'immersion (0 mois, 1 mois, 3 mois, 6 mois, 9 mois).

D'après L'analyse des résultats, ils ont constaté que l'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge de tous les mortiers utilisés conservés dans l'eau douce augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute jusqu'à l'âge de 270 jours. Par contre ils ont constaté que la compression de tous les mortiers conservés dans la solution sulfatique Mg (sulfate de magnésium) se développe positivement jusqu'à 90 jours d'immersion. Au-delà de cet âge, ils ont remarqué une chute de résistance à la compression. Cette chute de résistance est estimée, à l'âge de 270 jours, à 8 % pour le ciment CEMI, à 20 %, pour le ciment PZ20 et 4 % pour le ciment résistant au sulfate CRS. A partir de ces résultats, nous constatons que la chute de résistance est minimale dans le ciment CRS (faible taux de $C_3A = 1,4$ %).

Ils ont remarqué que dans la solution $MgSO_4$ la résistance est maximale dans le ciment pouzzolanique au à l'âge de 90 jours. A 28 jours la résistance du ciment témoin dépasse les autres ciments. Ce phénomène s'explique par l'activité lente de la réaction pouzzolanique, cette réaction qui se déclenche entre la silice réactive, qui se situe dans la partie vitreuse de la pouzzolane, et la portlandite $Ca(OH)_2$ libérée par l'hydratation du CPA, La réaction pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge, ceci mène à une hydratation moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances. Néanmoins, l'amélioration de la résistance peut s'obtenir par un

broyage avancé (finesse très élevée), une température de cure élevée ou avec l'utilisation des activateurs chimiques. [66]

Conclusion :

Le ciment est l'un des matériaux de construction le plus utilisé de nos jours, mais sa fabrication dégage d'importantes quantités de CO₂ et consomme beaucoup d'énergie.

L'utilisation des pouzzolanes naturelles dans la fabrication de ciment pour former de nouveaux liants présente une voix pour la diminution de l'impact environnemental comme elles présentent d'autres avantages comme l'économie de l'énergie et la préservation des ressources naturelles comparées au ciment Portland.

L'utilisation des pouzzolanes améliore les performances mécaniques à long terme et la durabilité des pâtes de ciment en réduisant leur porosité.

Chapitre II

Matériaux et méthodes

Introduction :

Ce travail expérimental est réalisé dans le but de l'évaluation de l'influence de l'ajout de la pouzzolane naturelle (tuf) sur le ciment portland. Dans ce chapitre nous exposons la partie expérimentale concernant la caractérisation des matériaux utilisés ainsi que les pâtes de ciments qui varient selon le pourcentage de pouzzolane ajoutée. (0%, 5%, 10%, 15%, 20%).

Nous avons effectué une série d'essais physiques, chimique, mécaniques et minéralogique au niveau du laboratoire de génie civil de l'université de Bejaia, laboratoire de la cimenterie de Ain el kebira(SCAEK), université de Boumerdas, université de Tizi Ouzou.

Les essais sur les pâtes de ciment au sein du laboratoire de Ain el kebira ont été réalisés avec les conditions : Une salle maintenue à une température de (20 ± 2) °C et à une humidité relative (ambiante) supérieure ou égale à HR 50 %.

II.1. Matériaux utilisés :**II.1.1. Le ciment :**

Le ciment utilisé dans tous les essais est un ciment CPA (ciment portland sans ajouts) composé seulement de clinker et de gypse provenant de la cimenterie de de Ain El kebira (SKAEK), wilaya de Sétif.

II.1.2. Le tuf :

Le tuf a été extrait à Jijel et reçu au laboratoire sous forme de poudre. Ce tuf est un matériau riche en silice (SiO_2) et en alumine (Al_2O_3) et appartenant à la famille des pouzzolanes naturelles.

II.1.3. L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisée dans notre étude est une eau potable « eau du robinet » .

II. 2. Les essais effectués sur les matières premières**: II. 2. 1. Analyse physique :****II.2.1.1. Masse volumique absolue (NF P18-555) :**

C'est la masse du matériau par unité de volume, exprimée en g/cm^3 . Cette masse volumique intègre les grains de l'agrégat sans intergranulaires et intergranulaires les vides entre les grains.

❖ But de l'essai :

Le but de cet essai est la détermination de la masse volumique réelle du matériau au moyen d'un pycnomètre.

❖ Mode opératoire :

- Remplir le pycnomètre avec l'acétone jusqu'au trait « 0 », lire (V1)
- Peser le pycnomètre et son contenu (acétone+pycnomètre), noté (M1)
- Peser une masse « M » de l'échantillon supérieur à 50g.
- Introduire progressivement dans le pycnomètre. Jusqu'au volume (V2)
- Agiter pour éliminer les bulles d'air.
- Peser le tout (pycnomètre+l'acétone+l'échantillon) soit une masse (M2).

NB : l'essai se réalise dans une salle à température constante de $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$.

La masse volumique absolue est déterminée en utilisant le dispositif représenté sur la figure II.1.

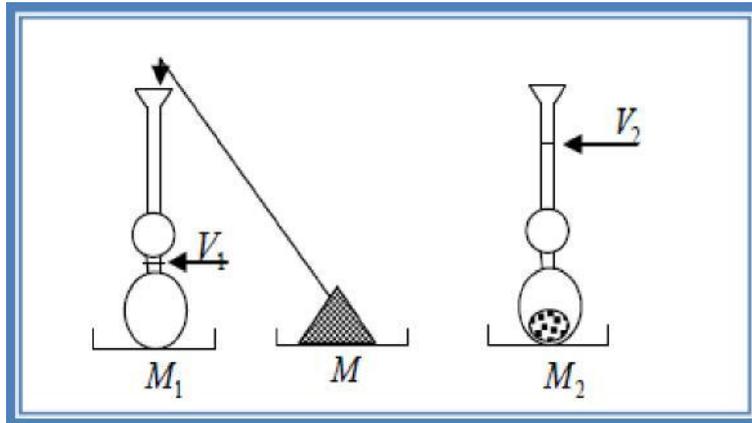


Figure II.1 : Dispositif expérimental de la masse volumique absolue



Figure II.2 : Le pycnomètre



Figure II.3 : Acétone

La masse volumique absolue se calcule par la formule suivante :

$$P_s = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1}$$

Avec :

M1 : masse de (acétone + pycnomètre) en **g**.

M2 : masse de (pycnomètre + l'acétone + l'échantillon) en **g**.

V1 : volume de l'acétone en **ml** (V1=0 ml).

V2 : volume de l'acétone et l'échantillon en **ml**.

II.2.1.2. Essais de la surface spécifique de Blaine (SSB) :

Le test de Blaine est une méthode de mesure de la finesse du ciment par la surface développée par unité de masse, elle est généralement exprimée en (cm²/g). Cet essai a été effectuée à la cimenterie de Ain El kebira.

❖ **But :**

Le but de cet essai est la détermination de la surface spécifique Blaine selon les spécifications de la norme européenne EN 196-6. Plus la surface spécifique de la poudre est importante, plus le temps mis par l'air pour traverser la poudre est long.

❖ **Mode opératoire :**

- Peser une quantité de ciment de porosité (e =0.500).
- Mettre la poudre de ciment dans la cellule puis compacter à l'aide du piston.
- Placer la surface conique de la cellule dans le rodage conique au sommet du manomètre.
- Obturer le dessus du cylindre avec bouchon adéquat. Ouvrir le robinet d'arrêt en amenant le niveau du liquide à la première ligne.
- Fermer le robinet d'arrêt et enlever le bouchon du cylindre.
- Démarrer le chronomètre dès que le liquide atteint la deuxième ligne.
- Arrêter le chronomètre dès que le liquide atteint le troisième repère.
- Relever le temps à 0.2s près et la température à 1°C près.
- Calculer la surface spécifique du ciment par la formule ci-dessous :

$$S=k \frac{\sqrt{e^3} \sqrt{t}}{\rho(1-e) \sqrt{\eta}}$$

Avec :

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

ρ : Masse volumique du ciment en g/cm³

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

t : Temps de passage de l'air dans la couche de la poudre de ciment en seconde.

m : La masse à introduire dans la cellule de l'appareil Blaine : **m= P_s.v. e.**

V = 1.6851 volume de la cellule.

e = porosité du ciment dans la cellule. (e=0,5).

P_s=masse volumique absolue. (Déjà calculée).

Les figures (figure II.4) et (II.5) décrit l'essai de la surface spécifique de Blaine :

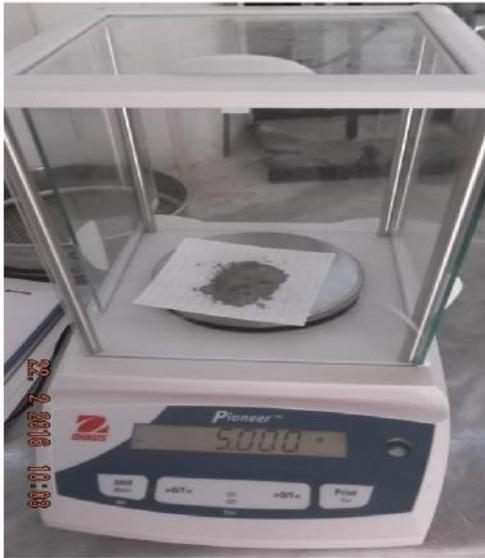


Figure II.4 : La quantité de ciment



Figure II.5 : Appareille de Blaine

II.2.1.3. L'essai de la granulométrie laser :

❖ **But de l'essai :**

Le but de la granulométrie laser est la mesure de la taille des particules comprise entre 0.05 et 900µm ce qui la rende plus précise. L'appareille est montée dans la figure (II.6) :



Figure II.6 : l'appareille de la granulométrie laser

❖ **Mode opératoire :**

L'essai de granulométrie a été effectué au niveau de l'université de Boumerdas. Il faut d'abord diluer l'échantillon. L'appareil réalise ensuite une mesure de bruit de fond afin d'enregistrer les phénomènes de diffraction engendrés par l'eau qui sert en général de diluant. Puis la solution à étudier est injectée dans la cellule de mesure, chaque particule passant devant

le faisceau lumineux dévie la lumière qui est ensuite analysée par des détecteurs, ensuite les données sont traitées par des calculs sur les matrices inverses.

Les mesures sont très rapides, il faut quelques secondes pour lire 2000 à 4000 fois la lumière diffusée par des milliers de particules présentes en même temps dans un faisceau laser.

II. 2. 2. Analyse chimique et minéralogique :

II. 2. 2.1. Essai de la fluorescence X :

La spectrométrie de fluorescence X est une technique d'analyse élémentaire globale permettant d'identifier et de déterminer la plupart des éléments chimiques qui composent un échantillon. Cette technique peut être utilisée pour des matériaux très variés : minéraux, céramiques, ciments, métaux, huiles, eau, verres..., sous forme solide ou liquide.

❖ Le but de l'essai :

Le but est de connaître la nature des éléments chimiques présents dans un échantillon ainsi que leurs concentrations massiques. Le spectre de fluorescence X a l'avantage de dépendre très peu de la combinaison chimique de l'élément, ce qui offre une détermination précise, à la fois quantitative et qualitative. L'essai de la fluorescence X été effectué à la cimenterie de Ain El Kebira.

❖ Le mode opératoire (préparation de la pastille) :

La pastille est obtenue par compression du matériau à l'aide d'une presse. Un liant peut-être ajouté pour conférer une bonne solidité mécanique à la pastille, dans notre cas le liant utilisé est la cellulose. La procédure de préparation est la suivante :

- Peser 12g de la poudre de matériau.
- Prendre 5 pilules de cellulose telle que chaque pilule pèse 1g.
- Mettre le matériau peser avec les 5g de cellulose dans le broyeur qu'on va mettre dans la machine de broyage pendant (2 à 3) min. (Voir les figures II.7).



Figure II.7 : appareil de broyage (HERZOG)

- A la fin du broyage, remplir une pastille avec le mélange (matériau+ cellulose) et la presser avec la machine de presse à 200bars pendant 60s.
- Enfin, la pastille est préparée comme le montre (la figure II.8)

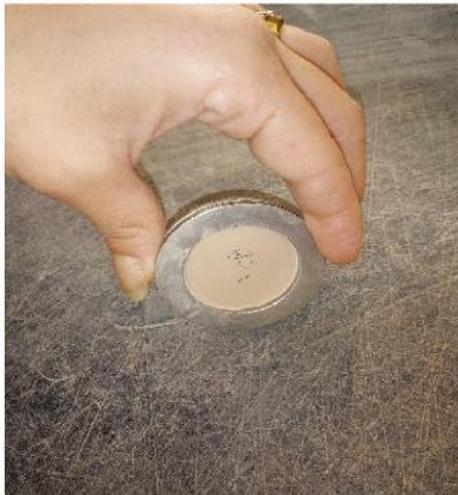


Figure II.8 : La pastille

- Ensuite placer la pastille préparée dans l'appareil de fluorescence X pour déterminer les différents composants de ciment(CPA), telle que montré sur la figure (II.9) :



Figure II.9 : Appareil de fluorescence X (ZETIUM)

II.3. Confection des éprouvettes :

II.3.1. Matériels nécessaires :

- Un récipient.
- Une balance à haute précision ($e=0.001g$).



Figure II.10 : Un récipient



Figure II.11. Une balance

- Une spatule.
- Un Chronomètre précis à 1 s près.
- Des éprouvettes cylindriques en acier de diamètre 2.54 cm et de hauteur 3 cm.
- table à choc



Figure II.12 : Eprouvette cylindrique



Figure II.13 : Table à choc

II.3.2. Quantité de matériaux :

Les proportions en masse doivent être les suivantes : une partie de ciment qui varie de 80 à 100%, une partie de tuf au différents pourcentage (0% ,5%,10%, 15%, et 20%) et une demi partie d'eau (rapport eau/ciment=0.5).

Chaque gâchée pour une éprouvette doit être constituée de (50 ±2) g de mélange ciment et tuf, (25 ±1) g d'eau.

La méthode de calcul des pourcentages du ciment et du tuf est la suivante :

Pour 5 % de tuf : 50 → 100%
 X → 5% } X=2,5g de tuf, donc 47.5g de ciment

Le tableau suivant (II.1) récapitule les quantités utilisées de tuf et du ciment :

Tableau II.1 : Quantité de matériau utilisés

Pourcentage (%)	Quantité de ciment(g)	Quantité du tuf (g)
0	50	0
5	47.5	2.5
10	45	5
15	42.5	7.5
20	40	10

II.3.3. Procédures de malaxage :

- Peser le ciment, la pouzzolane et l'eau au moyen de la balance (voir les figures II.14 et II.15).



Figure II.14 : Balance (peser le ciment)



figure II.15 : Balance (peser l'eau)

- Mélanger à sec le ciment et le tuf dans un bol jusqu'à homogénéisation.
- Introduire la quantité d'eau graduellement en prenant soin d'éviter toute perte d'eau ou de ciment ou de tuf.
- Malaxer manuellement chaque gâchée de pâte de ciment pendant 1min et 30s, ensuite enlever la pâte qui est sur les parois du bol et les mettre au milieu (voir la figure II.16).



Figure II.16 : Le Malaxage

- Reprendre le malaxage pendant 1min et 30s supplémentaires.

I.3.4. Conservation des éprouvettes :

- Après préparation et malaxage des pâtes, nous avons pris les moules cylindriques (2.54×3) bien nettoyés lavés et huilés.
- Nous avons ensuite rempli les moules en les vibrant à l'aide de la table à choc à 60 coups pour éviter les vides et avoir un échantillon homogène et bien mis en place.
- Après avoir rempli les moules, nous avons étalé la partie supérieure de moule uniformément en utilisant la spatule et les mettre dans la table à choc pour les faire vibrer. (Figure II.17).



Figure II.17 : Les éprouvettes dans la table à choc

- Mettre les éprouvettes préparés dans un récipient en le couvrant pour éviter l'évaporation de l'eau.
- Les échantillons sont ensuite mis dans l'étuve à 22°C pendant 24h pour le séchage. (Voir la figure II.18)



Figure II.18 : Les échantillons dans l'étuve

- près une conservation pendant 24 heures nous avons démoulé les échantillons, pesé et mesuré la hauteur et le diamètre pour chacune.
- Les éprouvettes démoulées sont mis dans un récipient qui contient de l'eau de robinet.
- Recouvrir le récipient à l'aide du sac en plastique et le laisser dans l'étuve à $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$ pendant 28 jours (voir la figure II.19).



Figure II.19 : Les éprouvettes dans l'eau

- Après 28 jours, nous avons retiré le récipient de l'étuve.
- Enlever les échantillons du récipient, les mettre dans un milieu propre pendant 1h pour le séchage.
- Peser les échantillons avec la balance puis mesurer leurs hauteurs et leurs diamètres à l'aide d'un Pied à coulisse. Figures (II.20) et (II.21) :



Figure II.20 : Pied à coulisse



Figure II.21 : La balance

I.4. Les essais effectués sur les éprouvettes :

II.4.1. Attaque chimique (sulfate de magnésium) :

- ❖ **But de l'essai :** L'essai d'attaque sulfatique consiste à étudier le comportement physique et chimique des échantillons.
- ❖ **Dosage des sulfates de magnésium (solution sulfatique) :** Selon la norme ASTM 267-2012 [67] pour chaque 1 litre d'eau on utilise 8.5g de sulfate de magnésium (8.5g/l). Dans notre cas nous avons préparé une solution de 3 litres d'eau de robinet et de 25.5g de poudre de sulfate de magnésium ($MgSO_4$).
- ❖ **Mode opératoire :**
 - Immerger les éprouvettes à tester dans un milieu agressif (un récipient rempli de la solution sulfatique).
 - Mettre les éprouvettes à l'étuve à $(22 \pm 2)^\circ C$ pendant 7 jours.
 - Après la période de 7 jours, nous avons enlevé les échantillons, et les avons fait sécher (pendant 1 h).
 - Peser les échantillons et mesurer la hauteur et le diamètre de chaque éprouvette.
 - Répéter ces étapes tous les 7 jours en renouvelant la solution sulfatique

La figure suivante (II.22) représente les éprouvettes immergées dans la solution sulfatique.



Figure II.22: Les éprouvettes dans la solution

I.4.2. Résistance à la compression :

C'est l'essai le plus couramment utilisé sur les bétons ou les mortiers à l'état durci. La précision des résultats de l'essai de la résistance à la compression est affectée par plusieurs paramètres : le type des matériaux et leurs dimensions, la préparation des faces d'essai ...etc. Cet essai a été effectuée au sein de laboratoire de la cimenterie de Ain El kebira.

- ❖ **But de l'essai :** Le but de cet essai est de suivre l'évolution de la résistance, pour chaque éprouvette, pour les âges de 0 jours, 7 jours, 14 jours, 28 jours, 56 jours et 84 jours après avoir retiré ces éprouvettes immergées dans la solution sulfatique.
- ❖ **Principe de l'essai :** Les éprouvettes étudiées sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section de l'éprouvette.
- ❖ **Conduite de l'essai :**
 - Centrer l'éprouvette sur la presse d'essai.
 - Appliquer un chargement croissant jusqu'à la rupture de l'éprouvette. (Telle que les résultats de la force s'expriment en MPa ou en kN)

La résistance à la compression a pour expression :

$$R_c = F/S$$

Avec :

F : charge de rupture exprimée en MN.

S : surface de l'éprouvette exprimée en m²

La figure (II.23) ci-dessous montre l'appareille de compression :

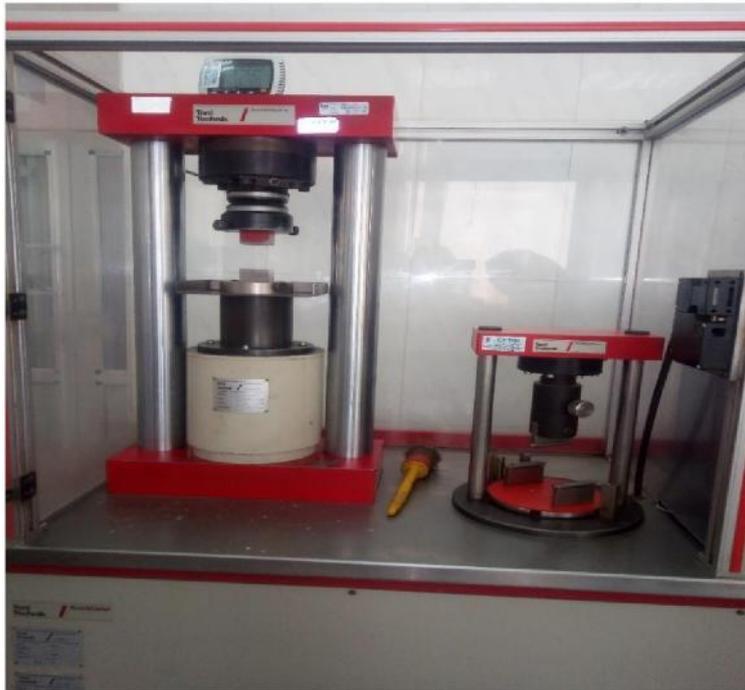


Figure II.23: Appareille de compression

II.4.3 Analyse par spectrométrie infrarouge (IRTF) :

Les échantillons à analyser par IRTF sont des poudres qui sont obtenues par broyage et tamisage à $0.125 \mu\text{m}$ des éprouvettes durcies. Voir les figures (II.24) et (II.2).



Figure II. 24 : Mortier



Figure II. 25 : Tamis (0.125)

❖ Le but de l'essai :

La spectroscopie infrarouge de Fourier est une technique utilisée pour la caractérisation et l'identification des molécules.

❖ Principe :

La spectrométrie infrarouge est une technique d'analyse qui consiste à soumettre un échantillon à un rayonnement infrarouge. Les molécules soumises à ce rayonnement absorbent

ces radiations en modifiant leurs énergies de vibration, suivant les types de liaisons et de fonctions chimiques présentes dans le milieu, donc l'obtention de spectre infrarouge.

Un traitement par ordinateur est nécessaire pour convertir les données brutes en données directement exploitables (lumière absorbée en fonction de la longueur d'onde).

L'essai de l'infrarouge a été effectué au niveau du laboratoire de génie des procédés de l'université de Bejaia. L'appareille est montrée sur la figure(II.26) :



Figure II.26 : Appareille de l'infrarouge

Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de présenter les matériaux, les méthodes et l'appareillage utilisé dans notre étude. Les essais présentés ont pour but de caractériser la matière première utilisée et de suivre les effets des attaques chimiques sur la durabilité des pattes de ciment confectionnées.

Chapitre III

Résultats et discussions

Introduction :

Dans ce dernier chapitre, nous allons présenter et discuter les résultats obtenus à partir des essais réalisés sur les matières premières et les pâtes de ciment après leurs expositions au milieu agressif, dans le but d'évaluer leur durabilité et leur capacité à résister à l'agression sulfatique.

III.1. Caractérisations de la matière première :**III.1.1. Analyse physique :****III.1.1.1. La masse volumique absolue :**

D'après l'essai effectué à la cimenterie de Ain El Kebira, les résultats de la masse volumique absolue sont notés dans le tableau suivant :

Tableau III.1: Masse volumique absolue du ciment et du tuf

Caractéristique physique	Ciment	Tuf
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.7248	2.31619

A partir de ces résultats, on remarque que la masse volumique du ciment est plus grande que celle du tuf, donc le tuf est plus léger par rapport au ciment.

III.1.1.2. La surface spécifique de Blaine :

L'essai de la surface spécifique de Blaine nous donne les résultats caractérisés dans le tableau III.2 ci-dessous :

Tableau III.2 : Surface spécifique de Blaine du ciment et du tuf

Caractéristique physique	Ciment	Tuf
Surface spécifique de BLAINE (cm ² /g)	4294	5156

On remarque que la surface spécifique de Blaine du tuf est plus grande en la comparant à celle du ciment, cela signifie que le tuf est plus fin et contient moins de vides en ces grains.

III.1.1.3. La granulométrie laser :**❖ Pour le ciment :**

La mesure de la taille des particules du ciment anhydre est effectuée par granulométrie laser et est présentée sur la figure III.1.

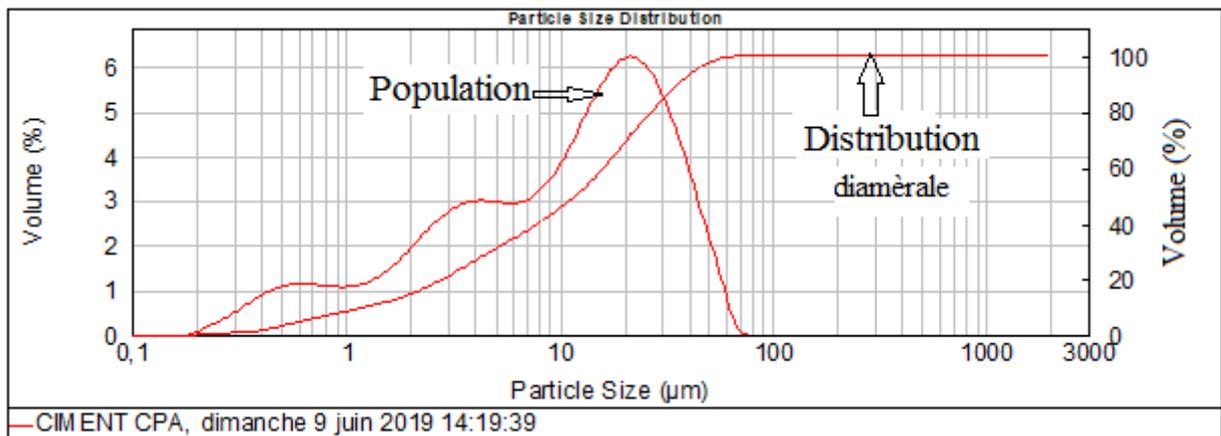


Figure III.1 : Distribution granulométrique de la taille des particules de ciment CEMI :

Cette poudre présente trois populations de taille de particules telle que :

- la grande population varie de 6.8 à 20.8µm.
- la moyenne population varie de 1.4 à 4.8 µm.
- la petite population varie de 0.2 à 1 µm.

La largeur de distribution (Span) est de 2,77. Une largeur faible signifié que la population est resserrée autour de D50 (50%) du volume des particules se trouve en dessous de cette taille), une largeur de distribution élevée signifie que la population est étalée autour du D50 ou qu’il y a plusieurs populations. Le D50 de cette poudre est de 10,3 µm, son mode (taille des particules correspondant au pic de plus intense) est de 20,4 µm.la différence de valeur entre le D50 et le mode indiqué que les tailles de particules ne sont pas bien réparties autour du D50.

Le D10 correspond à la taille de particules pour laquelle 10 % de la population se situe en dessous de cette valeur. Le D90 étant la taille pour laquelle 90 % de la population se situe en dessous de cette taille. Le Tableau III.3 récapitule l’analyse granulométrique de cette poudre.

Tableau III.3 : Analyse de la granulométrie du ciment CPA

D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)	Span(D90-D10) /D50
1.5	10.3	30.1	2.77

❖ **Pour le tuf :**

La courbe de la granulométrie laser du tuf est représentée dans la figure III2.

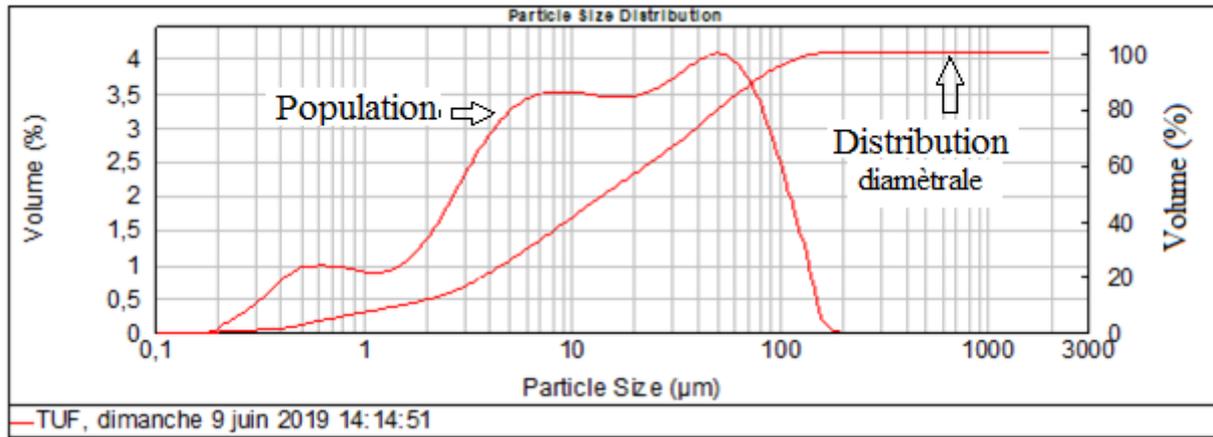


Figure III.2: Distribution granulométrique de la taille des particules du tuf

Le tuf présente, une fois broyé et tamisé à 0.125 µm, trois populations de grains :

La première est une famille de grains dont le diamètre est compris entre 0.2 à 1 µm, la deuxième population, la plus importante, est centrée autour de 1.7 à 8 µm et la troisième population est composée des grains dont le diamètre se situe autour de 20.3 µm à 70.3 µm.

Le tableau III.4 suivant récapitule l’analyse granulométrique du tuf

Tableau III.4 : Analyse de la granulométrie du tuf

D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)	Span(D90-D10)/D50
1.6	10.6	70.2	6.47

III.1.2. Analyse chimique et minéralogique :

III.1.2.1. Essai de la fluorescence X :

Le ciment (CEMI) :

Les analyses des compositions chimiques et minéralogiques qui sont effectuées par la fluorescence X sont présentés dans le tableau III.5 :

Tableau III.5 : Composition chimique du ciment CEMI et du tuf

Teneur %										
composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	Pf
ciment	22.03	4.27	5.19	63.12	1.55	1.54	0.136	0.144	0.004	1.32
tuf	71.06	12.76	2.09	1.9	0.73	0.01	2.45	1.79	0.014	7.20

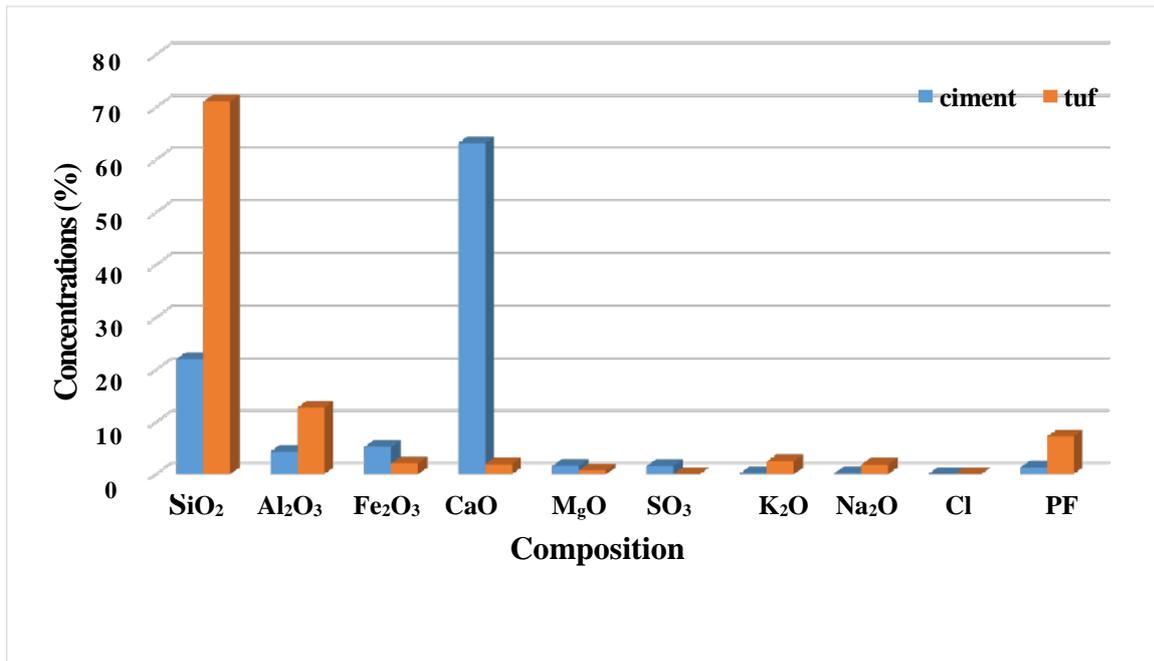


Figure III.3: Composition chimique du ciment (CEMI) et du tuf.

D'après les résultats obtenus on remarque que :

- Pour le ciment (CEMI) le composant le plus présent est : la chaux (CaO).
- Pour le tuf c'est la silice (SiO₂) qui est la plus présente par rapport aux autres composants.
- Le pourcentage d'alumine est plus important dans le tuf par rapport au ciment, la tendance contraire pour le fer.
- La perte au feu de tuf est plus grande que celle du ciment parce qu'elle n'a pas subi de cuisson.
- Ce qui concerne les autres composants sont presque égaux pour le ciment et le tuf avec un très faible pourcentage.

Les pouzzolanes ont une teneur élevée en dioxyde de silicium (SiO₂), ou en dioxyde de silicium et oxyde d'aluminiums combinés, et elles sont pauvres en oxyde de calcium. [16]

Le tableau suivant contient la composition minéralogique du ciment (clinker) :

Tableau III.6: Composition minéralogique du clinker selon BOGUE

Composants	Concentration (%)
C₃S	49.08
C₂S	26.10
C₃A	2.54
C₄AF	15.78

On remarque dans la composition minéralogique du clinker que :

- La teneur en C₃S est importante ce qui implique que le ciment se caractérise par une résistance importante à jeune âge.
- La teneur an C₃A est minime, donc Il n’y a pas de risque d’expansion.

III.3. Étude de la durabilité des pâtes de ciment :

III.3.1. La variation de volume :

Le volume des échantillons dépend selon le taux de substitution et du temps d’immersion dans la solution de sulfate de magnésium (Mg SO₄), comme le montre le tableau III.7 et la figure III.4.

Tableau III.7 : Variation de volume des échantillons

Indicatif	7j (%)	14j (%)	28j (%)	56j (%)	84j (%)
0%	2.72	4.67	7.4	12.37	12.48
5%	2.03	4.00	6.63	9.52	9.70
10%	1.88	2.51	5.21	6.93	7.04
15%	1.61	2.49	4.11	5.98	6.06
20%	1.36	1.99	3.35	5.18	5.30

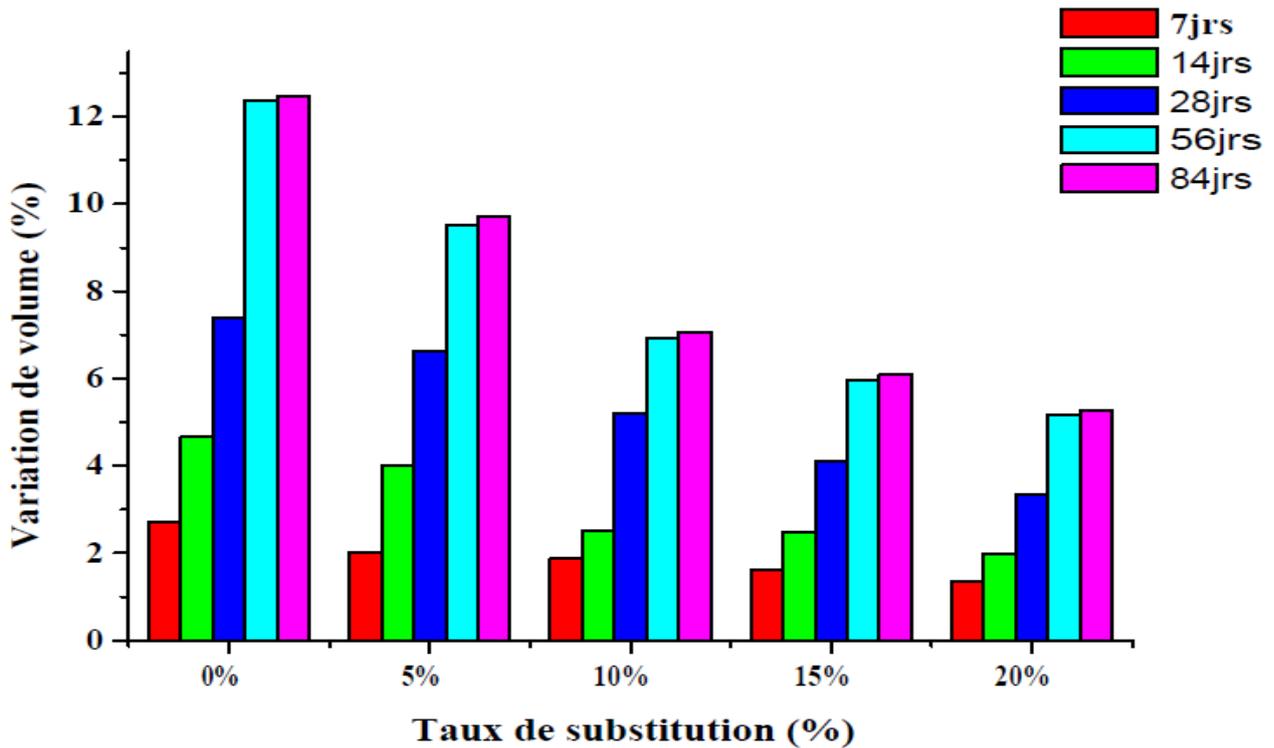


Figure III.4 : variation de volume des échantillons en fonction du temps et de substitution pouzzolanique

- A partir de la figure III.4, on constate que l'expansion évolue en fonction du temps et diminue en fonction du pourcentage d'ajout. Cette augmentation est dû à l'expansion des échantillons à cause des contraintes créées par la formation des ettringite secondaires.
- Le fait qu'il y'ait moins d'expansion dans les échantillons contenant de la pouzzolane conduit à une dégradation plus lente en comparant avec le matériau témoin. Une plus faible expansion conduisant à une porosité moins importante.
- Les volume dans tous les échantillons commencent à stabiliser à partir de 56 et 84 jours à cause de l'épuisement du C_3A non hydraté

III.3.2. La variation de masse :

Le suivi du changement de la masse des pâtes de ciment (0%,5%, 10%,15% et 20%) immergés dans la solution sulfatique est montré par la figure III.8 :

Tableau III.8 : Variation de masse des échantillons

Variation de masse en (%)					
Indicatif	7j	14j	28j	56j	84j
0%	1.36	1.58	1.67	1.72	1.87
5%	1.72	2.1	2.14	2.28	2.46
10%	1.78	2.3	2.46	2.68	2.79
15%	1.85	2.5	2.54	2.71	2.84
20%	1.90	2.6	2.66	2.78	2.92

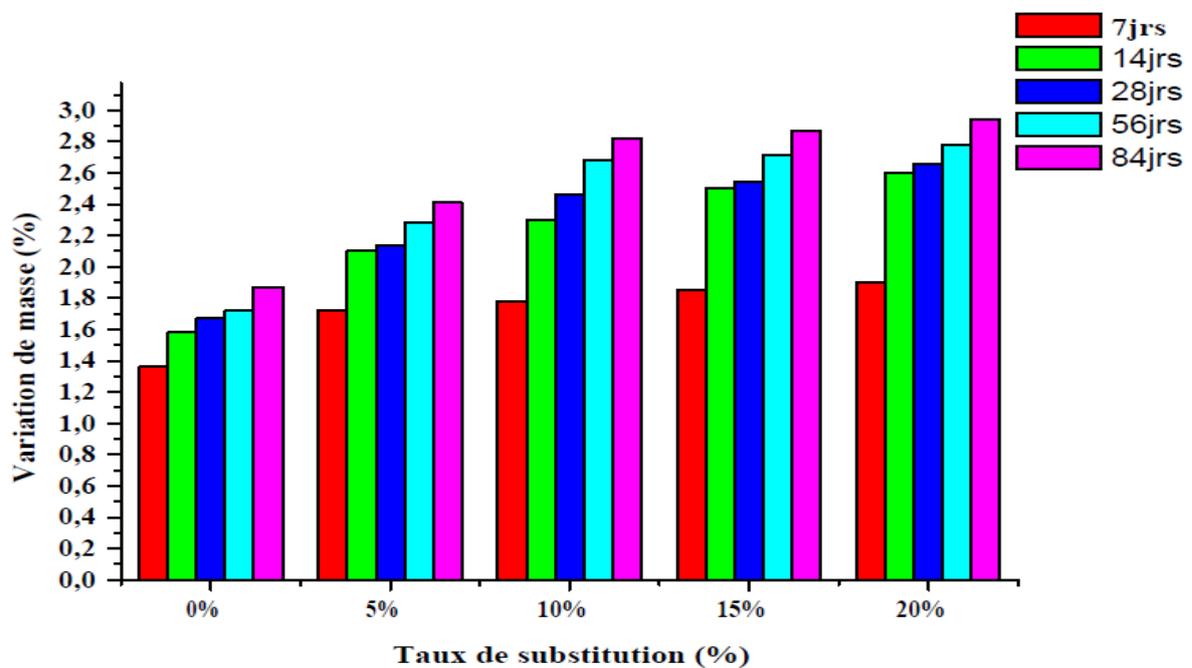


Figure III.5 : la variation de masse des échantillons en fonction du taux de pouzzolane et le temps d'immersion.

D'après l'analyse de ces résultats, on remarque que le gain de la masse augmente dans tous les échantillons et il existe une relation proportionnelle entre l'augmentation de la masse et le taux de substitution de pouzzolane. Plus que la pouzzolane introduite augmente plus la masse des échantillons augmente aussi car l'utilisation de la pouzzolane conduit à une matrice plus dense qui induit une dégradation plus lente du matériau les échantillons avec de la pouzzolane sont plus dense et de se fait se dégradent plus lentement.

III.3.3. La résistance à la compression :

Le tableau III.8 Présente l'évolution des résistances à la compression des cinq échantillons immergés dans la solution sulfatique avec des différents pourcentages de substitution [0% ,5% ,10% ,15% ,20%].

Tableau III.9 : Résistance à la compression du ciment et du tuf

Résistance à la compression (MPa)						
Indicatif	0jours	7 jours	14 jours	28 jours	56 jours	84jours
0%	31,32	41,82	39,04	36,56	34,66	25.88
5%	28,42	44,24	32,24	29,34	27,39	20.81
10%	26,08	44,71	42,46	35,60	27,83	25.83
15%	24,00	29,35	35,10	32,44	32,19	28.63
20%	20,03	24,5	29,70	31,65	27,12	25.37

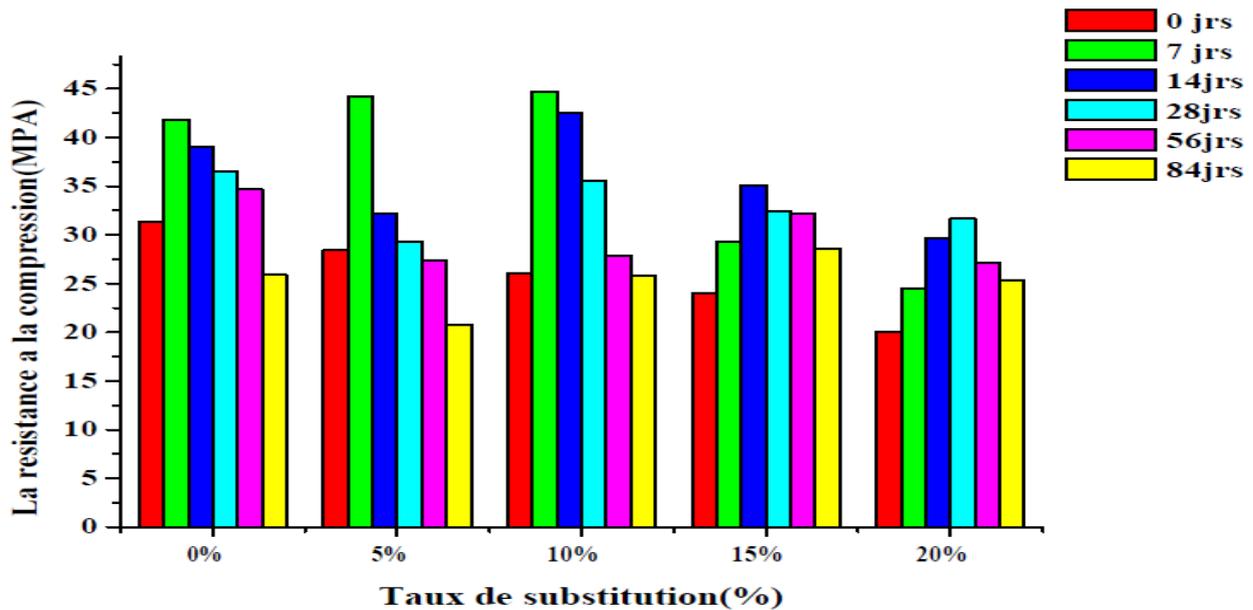


Figure III.6 : La résistance à la compression du ciment en fonction du taux de substitutions et du temps d'immersion.

- L'analyse des courbes montre que ces résistances sont d'autant plus faibles que le taux de la substitution de la pouzzolane est élevé.
- On remarque que la résistance du ciment témoin (31,31MPa) est plus importante par rapport à celle du ciment avec la pouzzolane qui sont respectivement de 28,42 ;26,08 ;24.00 ;20,03 MPa au jeune âge. Ce phénomène s'explique par l'activité lente de la réaction pouzzolanique. Par contre à long terme c'est la résistance des mortiers contenant 5 et 10 % de tuf (44,24 ; 44,70 MPa) qui dépasse celle du ciment témoin (41,82MPa) en formant des C-S-H supplémentaire qui améliore l'interface pâte-granat, ainsi qu'à la diminution de la porosité capillaire du mortier [66,68]
- Cependant, à partir du 14^{em} jours les résistances de tous les ciments commencent à diminuer. Cette chute de résistance est estimée, à l'âge de 84 jours, à 37,87 % pour le ciment CEMI (0%), et à 35,44% pour le (5%), 18,43% pour (15%)est n'est plus que de 14,52% pour le ciment qui contient un taux de substitution (20%). Cette diminution est dû à la diffusion des ions sulfates à travers la matrice cimentaire qui réagissent avec les produits d'hydratation en produisant de nouveaux cristaux (le gypse, l'ettringite) expansifs et qui font diminuer cette résistance. [66,68]

III.3.4. Spectres infrarouge obtenues

Les spectres infrarouges des échantillons traités par les différents pourcentages du tuf ainsi que le témoin sont représentés dans les figures suivantes :

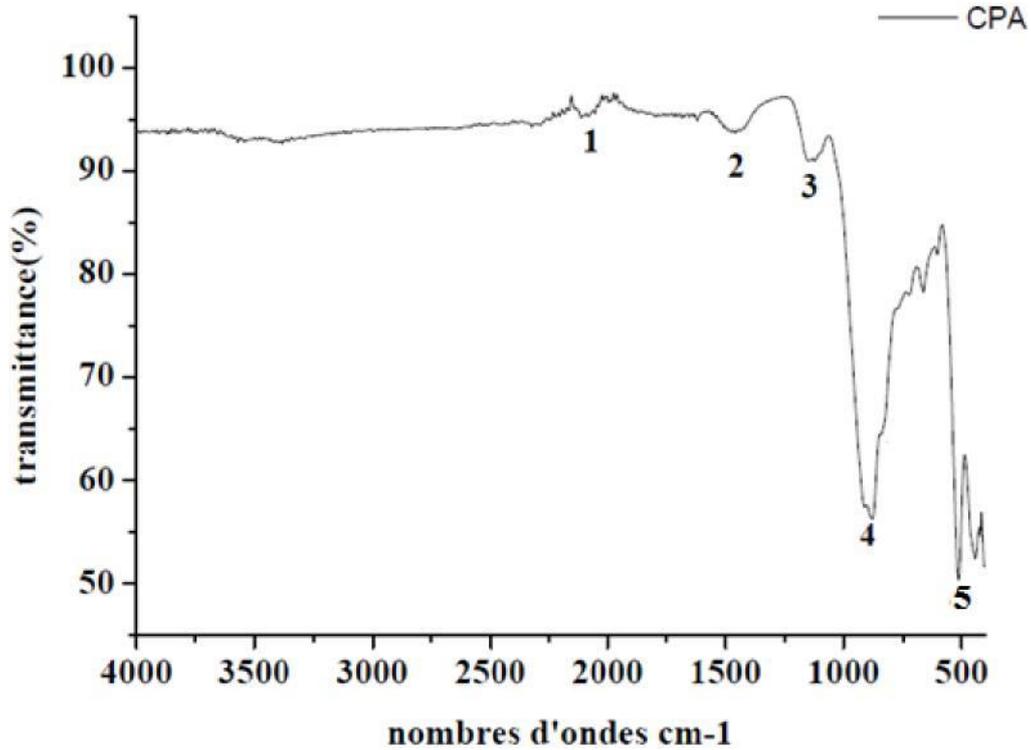


Figure III.7: Spectres infrarouge du ciment anhydre.

Le tableau suivant montre les différentes bandes observées dans le ciment anhydre ainsi que leur signification :

Tableau III.10: Analyse du spectre IR du ciment anhydre

Numéro	Bande observée (cm-1)	Groupement fonctionnel associé	Constituant associé
1	2113.40	Si-O	C ₂ S ,C ₃ S(clinker)
2	1457.38	Liaison C.O	Carbonate de calcium (CaCO ₃)
3	1121.92	Liaison S.O	Sulfate de calcium gypse
4	879.65	Liaison C.O	Carbonate de calcium (CaCO ₃)
5	514.37	Si-O-Si	Silicates clinker

Les figures suivantes, présentent les spectres infrarouges pour le ciment hydraté : 0 jours, 7 jours, 14 jours, 28 jours, 56 jours et 84 jours.

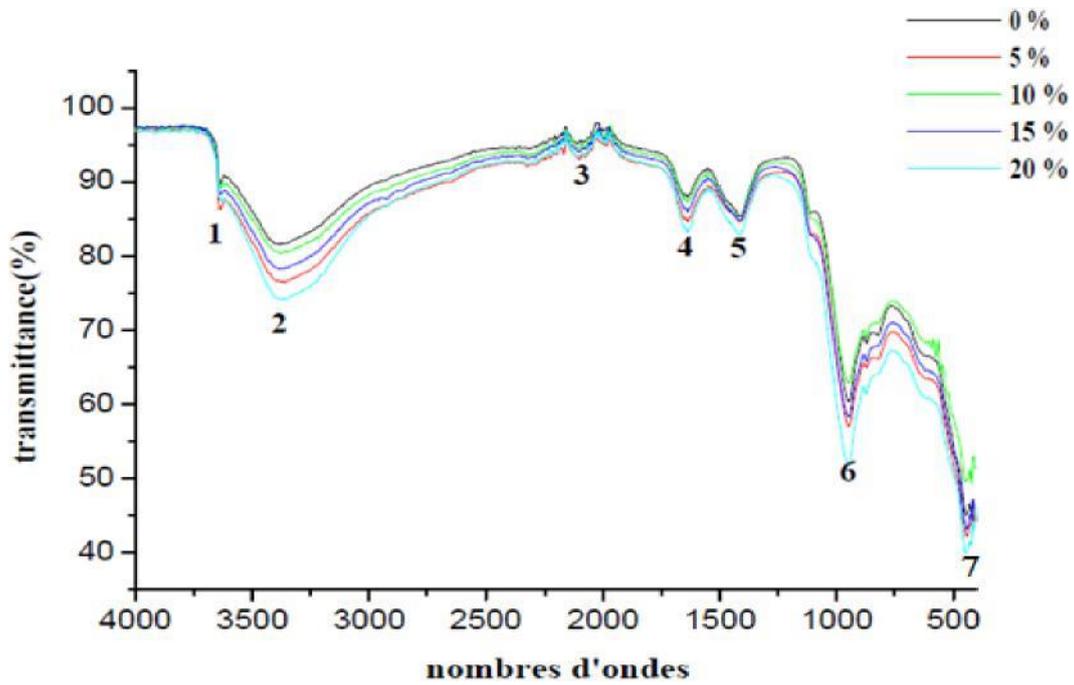


Figure III.8 : Spectres infrarouge des échantillons à 0 jours.

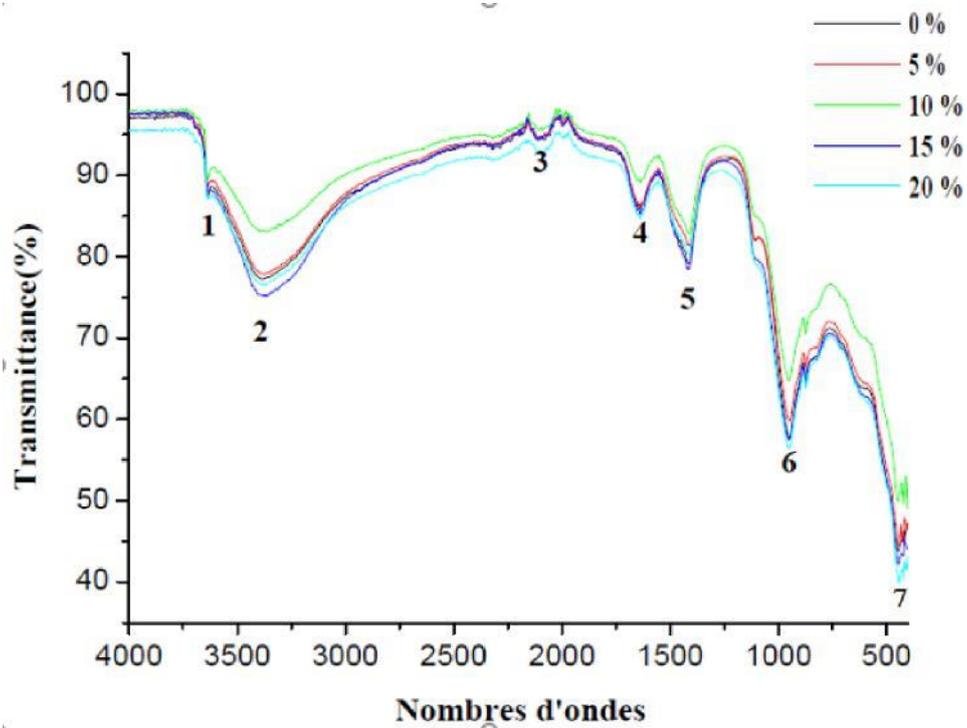


Figure III. 9 : Spectres infrarouge des échantillons de 7 jours.

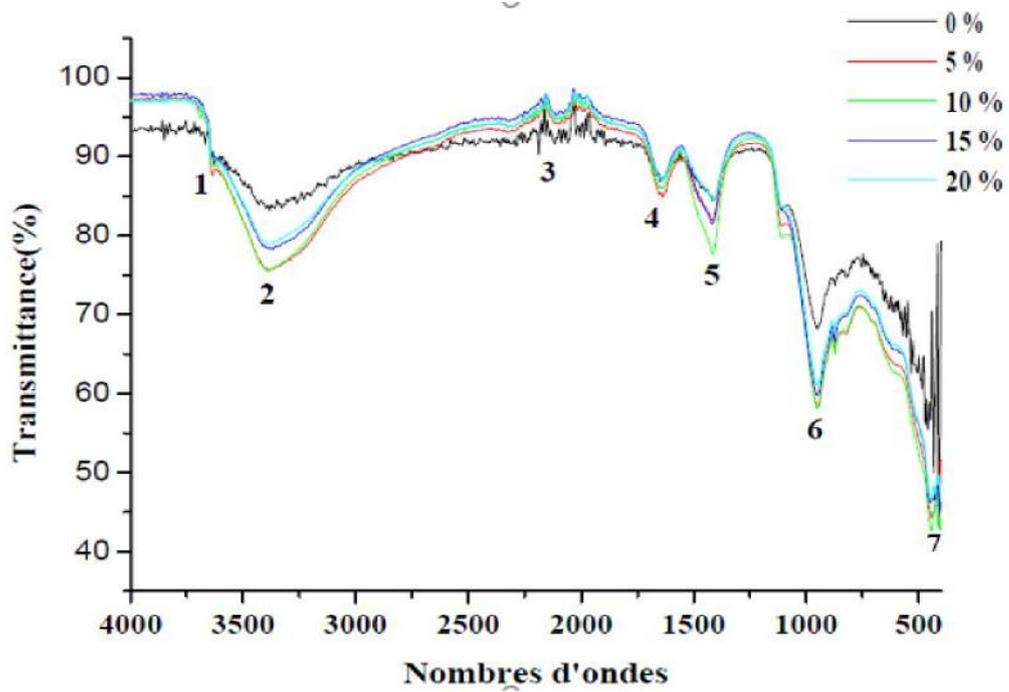


Figure III. 10 : Spectres infrarouge des échantillons de 14

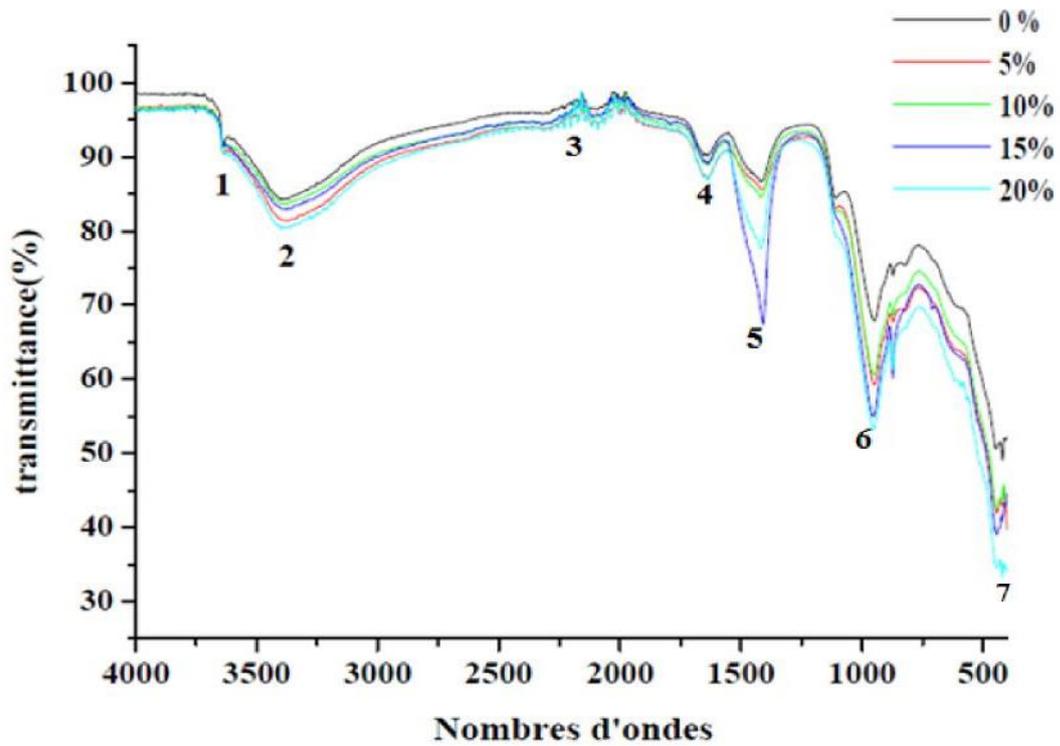


Figure III.11 : Spectres infrarouge des échantillons de 28

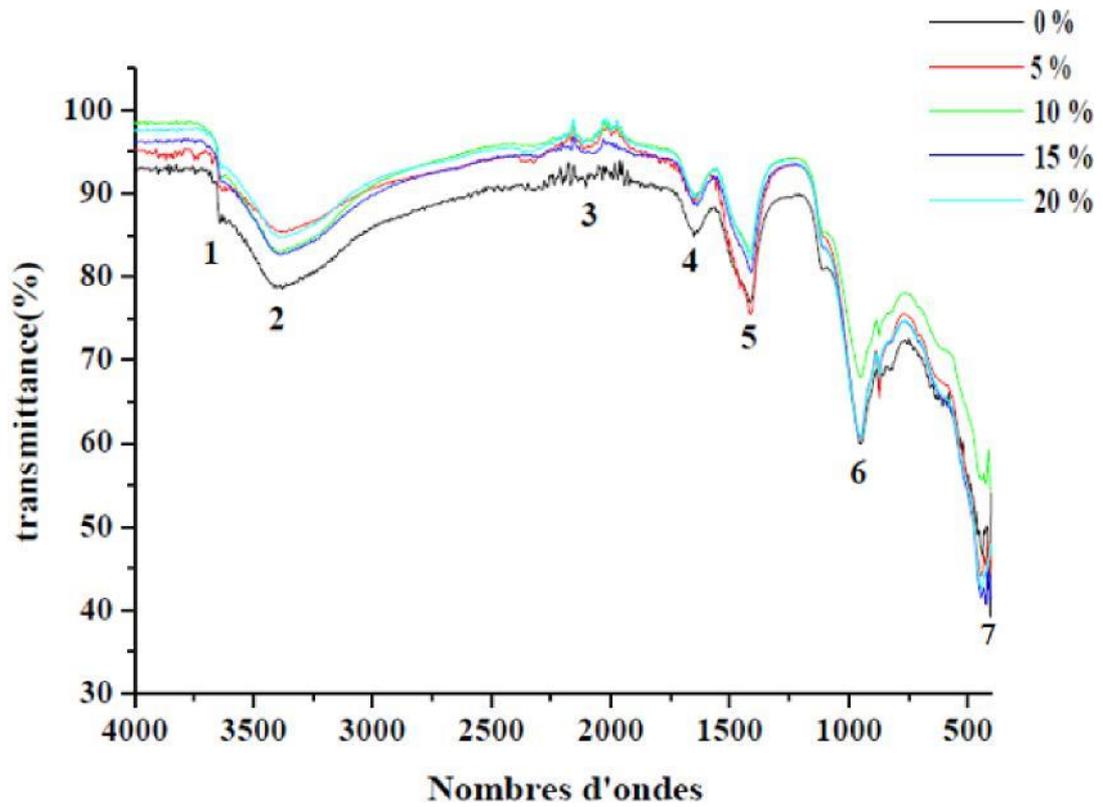


Figure III.12: Spectres infrarouge des échantillons de 56 jours.

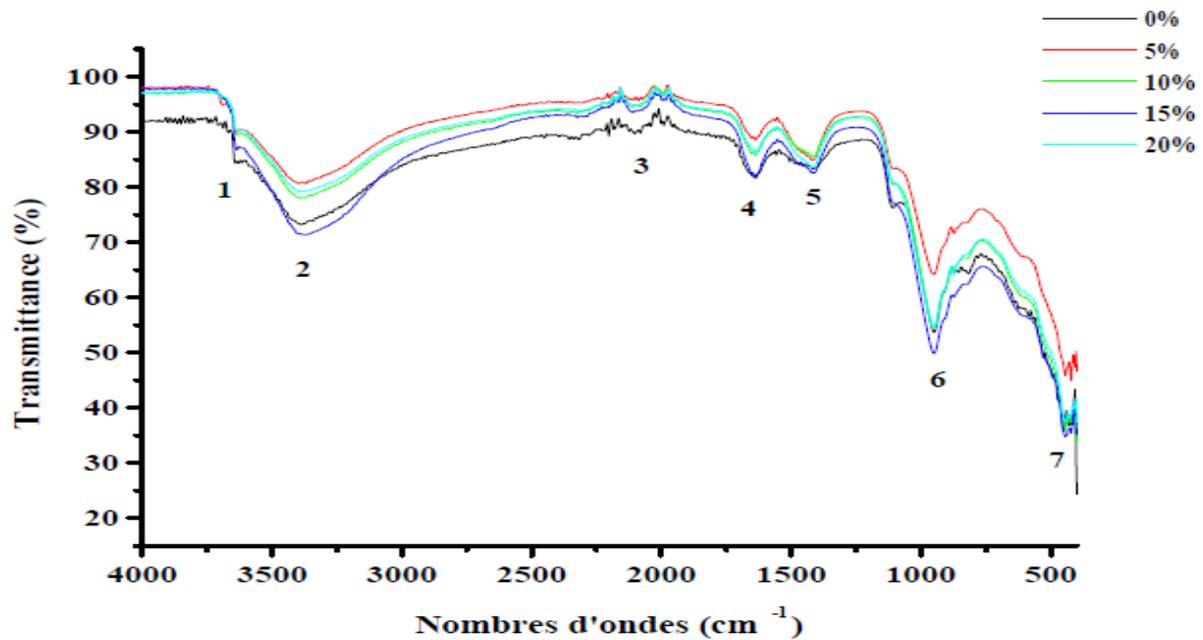


Figure III.13 : Spectres infrarouge des échantillons de 84 jours.

Le tableau III.11 présente les différentes bandes et leur signification :

Tableau III.11 : Analyse du spectre IR du ciment hydraté

Numéro	Bande observée (cm-1)	Groupement fonctionnel associé	Constituant associé
1	3639.35	Liaison OH	Portlandite (Ca(OH) ₂)
2	3380.69	Liaison OH	Eau contenue dans les hydrates (H ₂ O)
3	2113.40	Liaison S-O	Sulfates Ettringite
4	1636.30	Liaison OH	Eau contenue dans les hydrates (H ₂ O)
5	1420.11	Liaison C.O	Carbonate de calcium (CaCO ₃)
6	950.45	Liaison Si-O	Silicates CSH
7	488.30	Liaison Si-O-Al	CSH

Nous notons l'évolution suivante au cours de l'hydratation du ciment [69] :

- (1): Formation de la portlandite, repérée par une bande vers 3639.35 cm⁻¹.
- (2) et (4) : apparition d'une large bande vers 3380.69 cm⁻¹ et d'une bande à 1636cm-1, spécifiques à l'eau, liée à la présence de produits hydratés.
- (3): Disparition de la bande du gypse à 1121.92 cm⁻¹, avec apparition d'une bande vers 2113cm-1 attribuée à la formation de l'ettringite.
- (5): disparition de la bande 514.35 cm⁻¹du clinker dans le ciment anhydre pour former les silicates C₂S et C₃S, et apparition de CaCO₃ vers 1420.11 dans le ciment hydraté.
- (6): apparition d'une bande vers 950.45 cm⁻¹ de la liaison chimique Si-O dont le C₃S s'hydrate pour former des CSH.
- (7): vers 488.3cm⁻¹ formation des silice-aluminate dû à la prise pouzzolanique.

Conclusion :

Par l'analyse des résultats précédents, on remarque que les caractéristiques physiques du tuf (masse volumique absolue, surface spécifique de Blaine, granulométrie laser) sont meilleures par rapport au ciment (CEMI), donc l'incorporation du tuf dans le ciment amène à l'amélioration de la durabilité selon les différents pourcentages avec cet ajout (tuf). La résistance mécanique du tuf diminue de 23,35% par rapport au ciment témoin à court terme et elle améliore la résistance mécanique de 18,43% à long terme par la réduction des pores capillaires en diminuant la porosité de la pâte de ciment durcie et en augmentant la résistance de ces pâtes de ciment contre les attaques sulfatique.

*Conclusion
générale et
perspectives*

Conclusion générale et perspectives

Dans le but de répondre à l'objectif de notre projet de fin de cycle qui consiste à l'étude de la durabilité d'un ciment CEMI avec la substitution partielle du ciment par la pouzzolane(tuf). Cette substitution a pour but la réduction des émissions de CO₂ produites par la cuisson du clinker qui provoque la pollution de l'environnement.

Dans la partie expérimentale de notre travail nous avons étudié quatre taux de substitutions pouzzolaniques :5% ,10% ,15% ,20% et 0% qui est le témoin, dans une solution sulfatique de magnésium (MgSO₄) afin d'évaluer l'influence de l'attaque chimique sur les propriétés des pâtes de ciment contenant la pouzzolane.

L'ajout pouzzolanique conduit à la réduction du taux d'expansion dans les pâtes du ciment, ce qui influe positivement sur les performances mécaniques et sur la durabilité des ciments.

Les échantillons contenant de la pouzzolane ont subi moins de dégradation par rapport aux échantillons témoin, cela c'est traduit par une augmentation plus importante de la masse. En ce qui concerne la résistance à la compression, on a constaté une légère diminution à court terme avec l'augmentation du taux de substitution en pouzzolane (23,35%). A long terme la résistance à la compression des pâtes de ciment avec de la pouzzolane augmente plus rapidement (18,43%) que celles des pâtes de ciments témoin à cause de l'hydratation lente de la pouzzolane.

Les analyses de l'infrarouge montrent que le tuf a réagi dans la matrice cimentaire et il produit des phases semblables à celles retrouvées dans les pattes de ciment portland qui sont : l'ettringite, CSH, et la portlandite.

Ceci mène à conclure que l'utilisation du tuf par substitution dans le ciment est l'une des solutions qui répond aux problèmes environnementaux liées à la fabrication du ciment et ceux de résistance et de durabilité.

En guise de perspective, il serait intéressant d'étudier la durabilité à plus long terme et de tester d'autres types d'attaques chimiques.

Références bibliographiques

- [1] L. Laoufi* et al « Evaluation de la durabilité de mortiers pouzzolaniques exposés à une attaque chimique », Université d'Oran, Algérie 2016.
- [2] Ahmed Gmira « Etude structurale et thermodynamique d'hydrates modèle du ciment » thèse de doctorat, l'université d'Orléans, 2003.
- [3] Lacoste Yves « L'industrie du ciment. In : Annales de Géographie » t. 66, n°357, 1957. pp. 411-435,2018.
- [4] Nicolas Yves « L'or gris de Grenoble. In : Le Monde alpin et rhodanien». Revue régionale d'ethnologie, n°3-4/1987. Industrie, techniques et patrimoine. pp. 145-162. 04/04/2018.
- [5] [NF EN 197-1,2011 Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants].
- [6] [NF P15-301 juin 1994 liant hydraulique-ciment courant-composition, spécification et critère de conformité].
- [7] Marie-Noëlle de Noirfontaine « Etude structurale et cristallographie des composés du ciment anhydre » thèse de doctorat, école polytechnique ,2000.
- [8] Autres : cours Ghomari Fouad « de science des matériaux de construction » université Aboubekar Belkaid, 2005-2006.
- [9] Les différentes voie de fabrique le ciment http : [www.ecocem.fr] , consulté le 17/06/2019.
- [10] Mohammed Rafiq KADRI , Soumia ROUIGUEB, Hadjer , Abir CHIKH « Contribution à la réduction des émissions de CO₂ et de la consommation énergétique dans l'industrie cimentaire par l'amélioration d'un système de production : Cas de la cimenterie de Béni-Saf » mémoire de master , Université Abou bekr Belkaid – Tlemcen,2017
- [11] David Lozach « Les constituants de béton et de mortier » collection cimbéton G10, 2005.
- [12] Mazerai Naima « durabilité d'un mortier à base d'un ciment Portland composé à la pouzzolane CPJ-CEMII vis-à-vis d'un milieu agressif » mémoire du master, Université Aboubekar Belkaïd Tlemcen,2013.
- [13] Centre d'information sur le ciment et ces applications, « ciments et bétons » ,2005

- [14] Rim Ragoug « attaque sulfatique externe des matériaux cimentaires : impact de différents facteurs âge, composition de liant, présence de chlorures » thèse de doctorat, université Paris-EST ,2017.
- [15] M. Venuat, La pratique des ciments, mortiers et bétons, Tome 1 :« Caractéristiques des Liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers », édition2, Collection Moniteur,277p, 1989.
- [16] Amouri Chahinez « Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité) » thèse de doctorat, université mentouri constantine,2009.
- [17] [fr.scribd.com/document/157617038/Chimie-Des-Ciment-2].
- [18] Document (SCAEK) Spa « fabrication du ciment ».
- [19] Guide pratique de béton « Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables » Editeur : Holcim (Suisse) SA 6ème édition 2015.
- [20] Bitar Zeyeb « Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux (calcaire) sur le Comportement mécanique du mortier » mémoire du master, université Mohamed BOUDIAF- M'sila, Algérie, 2015/2016.
- [21] Zeroub Hamid « Valorisation du verre dans l'élaboration d'un béton durable (approche expérimentale) » mémoire du magistère, université M'Hamed bougara Boumerdes,2012.
- [22] [Joudi-Bahri, et al., 2012]
- [23] [Diederich, 2010, Jones, et al., 2003]
- [24] Herve Pichon « Le système "pouzzolanes naturelles-chaux-eau" à 38 et 100[C] : relations entre la réactivité chimique, les phases néoformées et les conséquences physico mécaniques (application aux matériaux volcaniques du Massif Central français) » thèse de doctorat, université joseph Fourier Grenoble, 2013.
- [25] Bessenois Mohammed Zakaria « Impact et contribution thermo énergétique des matériaux de construction à base pouzzolanique dans l'habitat » mémoire de magister, université Abou Bakr Belkadi tlemcen,2010

- [26] Kerrouzi Ismail, Boualla « l'influence de l'ajout de la pouzzolane sur les caractéristiques physico-chimique des ciments » mémoire de master, université Mohamed Boudiaf d'Oran.
- [27] Autres : cours Chelouah, matériaux innovant, université A. Mira Bejaïa 2017/2018.
- [28] Mohamed Adjoudj « Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton » thèse de doctorat, université Mentouri constantine,2016.
- [29] Touati Samia, Barbouchi Ahmed :« l'étude d'un mélange tuf –sable concassé pour assise de chaussée » mémoire de master, Université Ahmed Draia Adrar,20172018].
- [30] Guide de prescription de ciments pour la construction durable (cas des bétons coulés en place) collection cimbeton T47 ,2009.
- [31] Abdellah Demdoum « Comportement hydrique et mécanique d'un mélange de Bentonite-Sable Calcaire-Tuf : Application à la conception des Installations de Stockage des Déchets (ISD) », thèse de doctorat, université Aboubaker belkaid,2019.
- [32] Emmanuel Moudilou « cinétiques et mécanismes de relargage des métaux lourds présents en traces dans les matrices cimentaires », thèse de doctorat, université d'orleans,2003.
- [33] Blaribi Omar :« Durabilité des béton autoplaçant à base de vase et pouzzolane » thèse de doctorat, Université Cergy-Pontoise ,2015.
- [34] Matthieu Bertin « L'impact du séchage au jeune âge sur la carbonatation des matériaux cimentaires avec additions minérales » thèse de doctorat, université paris-est-marne-la-vallee,2018.
- [35] Bach Quoc Tien « Influence du remplacement du ciment par des cendres volantes à faible teneur en calcium sur la cinétique de prise de pâtes de ciment au jeune âge » thèse de doctorat, Université de Nantes, 2015.
- [36] E. Silitonga « Valorisation des sédiments marins contaminés par solidification/ stabilisation à base de liants hydrauliques et de fumée de silice » thèse de doctorat, université de Caen/basse Normandie, 2012.
- [37] Philippe rocher, la pouzzolane, géologue, BRGM auvergne.
- [38] G. Dreux "Nouveau guide du béton " Edition, Eyrolles- Paris- 1998, P 29-41.
- [39] Ciments Français, La fabrication des ciments. **Eyrolles**, 1993.

- [40] Badr Eddine Kchakech « Étude De l 'influence de l'échauffement subi par un béton sur le risque d'expansions associées à la Réaction Sulfatique Interne » Thèse de doctorat, Université Paris-Est doctorat, 2016.
- [41] Benoît Hilloulin : « Méthodes avancées et analyses multi-échelles pour l'étude de l'auto cicatrisation des fissures dans les matériaux cimentaires » thèse de doctorat, Université de Nantes Angers le mans, 2015
- [42] Ramachandran V.S., Malhotra, V.M., Jolicoeur, C., Spiratos, N., (1998) Superplasticizers : Properties and Applications in Concrete, Ed. CANMET, Ottawa, Canada.
- [43] Mohamed Lyes Kamel khoudjia:« Etude des propriété physicomécanique et rhéologique des bétons à base des sables de carrières expérimentation et modélisation, » thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra ,2016.
- [44] Older, hydration, setting, and hardening pf portland cement. Lea's chemistry of cement and concrete,1998,
- [45] AOUIDIDI Lwiza « Caractérisation d'un ciment à base de pouzzolane » mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016
- [46] Sylvain Stephan « étude de l'influence de l'hydratation des laitiers sur les propriétés de transfert gazeux dans les matériaux cimentaires », Thèse de doctorat, Université de Bourgogn,2018.
- [47] Philippines LALAN « Influence d'une température de 70 °C sur la géochimie, la microstructure et la diffusion aux interfaces béton / argile » thèse de doctorat, Université de recherche Paris Sciences et Lettres,2016.
- [48] Emmanuelle Guillon : « durabilité des matériaux cimentaires-modélisation de l'influence des équilibres physico-chimique sur la microstructure et les propriétés mécanique résiduelles » thèse de doctorat, école normale supérieure de cachan,2004.
- [49] Chikouche Mohamed Aziz « Optimisation des ajouts à base d'argiles vaseuses et leurs effets sur les propriétés des matériaux cimentaires » thèse de doctorat Université de M'sila,2016.
- [50] Thi Thuy Ha Bach « Évolution physico-chimique des liants bas PH hydratés : influence de la température et mécanisme de rétention des alcalins » thèse de doctorat, université de Bourgogne,2012.

- [51] Dhoury Mélanie « influence des ions lithium et borate sur l'hydratation de ciments sulfo-alumineux : application au conditionnement de résines échangeuses d'ions boratées » thèse de doctorat, Université Montpellier, 2016.
- [52] Rachida Idir « mécanisme d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et les réactions pouzzolanique » thèse de doctorat, université de toulouse, 10/07/2009.
- [53] Ismail Hanafi, AIT AMRANE Djohar « étude de l'influence des ajouts cimentaires sur l'activité pouzzolanique des mortiers » mémoire de master, Université A. Mira de béjaïa, 2012.
- [54] Amari Mohand « Activation chimique de la pouzzolane » mémoire de master, Université A. Mira Bejaïa, 2017-2018.
- [55] M. Mouli et al : « pouzzolane de Beni- saf bilan de quelques études » ENSET ORAN, 2009.
- [56] Gourara Badreddine, korichi Aymen : « Effet de la pouzzolane naturelle sur la porosité d'un béton » mémoire de master, Université moulay Tahar-Saida, 2017.
- [57] Akli Younsi « Carbonatation de bétons à forts taux de substitution du ciment par des additions minérales », thèse de doctorat, Université de la rochelle 2012.
- [58] ROBERT L. DAY : 'POZZOLANS FOR USE IN LOW-COST' A State of the Art Report prepared for : The INTERNATIONAL DEVELOPMENT RESEARCH CENTRE OTTAWA, CANADA. Department of Civil Engineering, University of Calgary. September, 1990
- [59] B. C. Beni-remour « Matériaux pouzzolaniques Etude physico-chimique et mécanique des mortiers et bétons contenant de la pouzzolane », Thèse de fin d'étude Ingéniorat, USTO, (1993)
- [60] A. Mebrouki « influence de la pouzzolane de Beni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des mortiers » thèse de doctorat, Université Mostaganem, juin 2003
- [61] Sabri Safia « Elaboration et détermination des propriétés d'un nouveau ciment composé à base de pouzzolanes artificielles » mémoire de magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2010.
- [62] Belhocine Aida, Nagoudi Nadjat, « Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux », mémoire de master, Université Kasdi Merbah – Ouargla. 2014.

- [63] A kerbouche, et al, article « influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers », ENSET Oran 2009.
- [64] M. ROUIBI et al « Durabilité des mortiers en fonction de la nature de sable et le taux de la pouzzolane naturelle » USTMB Oran,2009
- [65] M. Mouli et al « Resistance aux acides et a la pénétration des ions chlorures des mortiers avec pouzzolane et fine calcaire » ENSET Oran,2009
- [66] M. SALHI*1 et al « Influence des ajouts minéraux sur la durabilité des mortiers conservés dans des milieux agressifs » université de Chlef ,2012
- [67] ASTM C 267-2012.
- [68] N. Kaidi et al « caractéristiques mécaniques de bétons contenant une pouzzolane naturelle face aux attaques a l'eau de mer et aux sulfates » International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) 2009.
- [69] Stéphane Delair « étude de l'atténuation des efflorescences sur les matériaux cimentaires au moyen de produits pouzzolaniques » thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne,2008.

Résumé

Dans ce travail nous étudions les effets de la substitution d'une partie de ciment par une pouzzolane naturelle sur la durabilité des pâtes de ciment, en suivant l'évolution de la résistance à la compression, de l'expansion du volume et la variation de la masse. Pour se faire, les pâtes de ciment durcies ont été soumises à des attaques chimiques dans des solutions sulfatées, la pouzzolane utilisée a été caractérisée par des techniques physiques et chimiques telle que la granulométrie laser, la fluorescence X et la surface spécifique de Blaine. Les résultats obtenus ont montré une amélioration de la durabilité et de la résistance à la compression à long terme.

Mots clés : Pouzzolane naturelle, le tuf, durabilité, attaque chimique, résistance mécanique.

Abstract

In this study we foccus on the monetoring of the durability of cements pasts containing diffrents proportions of natural pouzzolane, the evolution of compressive strength, expansion and variation of masse were stadied. The naturals pouzzolans were caracteries in terme of physical and chemical using a laser particule size, x-ray fluorescence and surface area of Blaine. The results chowed an improvement in the durability and résistance to compression in the long terme.

Keywords : Natural pozzolana, tuff, durability, chemical attack, mechanical resistance.

ملخص

في هذا العمل، ندرس آثار استبدال جزء من الأسمنت بوزولان طبيعي على متانة معاجين الأسمنت، من خلال متابعة تطور قوة الضغط وتوسيع الحجم والتباين في الكتلة. للقيام بذلك، تعرضت عجائن الأسمنت المتصلدة لهجوم كيميائي في المحاليل الكبريتية، فقد كان البوزولان المستخدم بتقنيات فيزيائية وكيميائية مثل حجم الجسيمات بالليزر، ومضان الأشعة السينية، ومساحة سطح بلين. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها تحسنا في المتانة وقوة الضغط على المدى الطويل.

الكلمات المفتاحية: البوزولانا الطبيعية، التوف، المتانة، الهجوم الكيميائي، المقاومة الميكانيكية.