

Ordre...../F.S.S.A/UAMOB/2024

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ BOUIRA



Faculté des Sciences et des sciences appliquées

Département Génie Civil

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

Daou Sohaib

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière : **Génie Civil**

Option : Matériaux en Génie Civil

Thème :

Elaboration et caractérisation d'un mortier à base de pouzzolane naturelle

Devant le jury composé de :

| | | |
|---------------------|---------------------|-------------|
| Mr Kennouche Salim | UAMOB / GENIE CIVIL | PRESIDENT |
| Mme Boumaiza Malika | UAMOB / GENIE CIVIL | PROMOTRICE |
| Mr Hami Brahim | UAMOB / GENIE CIVIL | EXAMINATEUR |

Année Universitaire 2023/2024



Remerciements

En termes de reconnaissances, je tiens à témoigner mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribués de près ou de loin au bon déroulement de mon projet de fin d'étude et à l'élaboration de ce modeste travail.

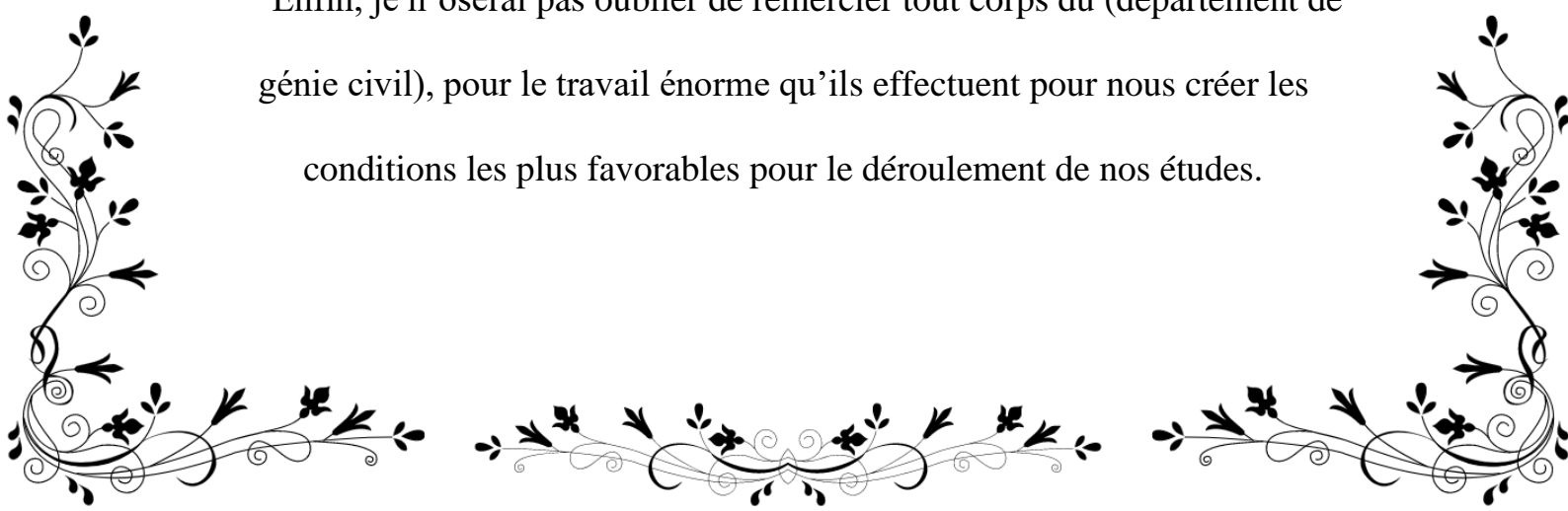
Mes sincères gratitude à ma promotrice **Mme Boumaiza** d'avoir proposé et dirigé mon projet de fin d'études.

Je remercie les membres de jury, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire et juger mon travail. Je leurs exprime toute ma gratitude pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail

Sans oublier l'ensemble du personnel de **LCTP BOUIRA** et **Le Laboratoire de département** pour le suivi et l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

Dans l'impossibilité de citer tous les noms, mes sincères remerciements vont à tous ceux et celles, qui de près ou de loin, ont permis par leurs conseils et leurs compétences la réalisation de ce mémoire.

Enfin, je n'oserai pas oublier de remercier tout corps du (département de génie civil), pour le travail énorme qu'ils effectuent pour nous créer les conditions les plus favorables pour le déroulement de nos études.



A decorative border of black and white line art featuring various flowers, leaves, and vines, framing the central text.

Dédicaces

Je dédie ce projet :

A ma chère mère qui est ma perle rare,

A ma chère tante Hafsa qui est ma deuxième mère,

A mon cher père qui est mon héros,

qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir, m'aimer
et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A ma chère sœur, Khouloud Rayene

A mon cher frère, Aymen

A ma chère famille maternelle qui ne cesse de m'encourager et m'aimer.
Qui ont aussi partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce
travail.

A mes chers amis, K. Youba, T. Rayan, Pour leurs aides et supports dans les moments
difficiles.

A mon cher ami Lounas en particulier qui a toujours été là pour moi et pour les efforts
immenses qu'il a fait pour moi

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé et à qui je souhaite plus de succès.

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

A tous ceux qui ont cru en moi.

Merci !

Sohaib

Résumé

L'utilisation des ajouts cimentaires dans la production de ciment fait partie des développements les plus récents dans la production de ciment, car ces derniers améliorent les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires et réduisent la consommation de clinker, ce qui conduit à réduire les problèmes liés à l'environnement.

L'objectif de ce travail expérimental est de substituer une partie de ciment par la pouzzolane, selon les pourcentages suivants 0%, 10 %, 20% et 30% du poids de ciment. Et d'analyser les caractéristiques de ciment et le comportement du mortier à base de pouzzolane.

La composition chimique, la finesse, le poids spécifique de ciment et de la pouzzolane ont été analysées. En plus le comportement mécanique, la consistance et le début et fin de prise du mortier ont été étudiés et cela pour deux types de pouzzolane rouge et noire.

Les résultats montrent que la quantité d'ajout pouzzolane influe sur la résistance mécanique en compression et flexion des mortiers et cela pour les deux pouzzolanes, en plus la pouzzolane noire donne des résistances plus proches au mortier témoin par rapport à la rouge.

Mots clés : pouzzolane naturelle, résistance mécanique, consistance, temps de prise.

Abstract

The use of cementitious additives in cement production is one of the most recent developments in cement production, as they improve the mechanical properties of cementitious materials and reduce clinker consumption, which leads to reducing problems associated with the environment.

The objective of this experimental work is to replace a part of cement by pozzolan. And this by replacing it with the following percentages 0%, 10%, 20% and 30% of the weight of cement. And to analyze the characteristics of cement and the behavior of pozzolan-based mortar.

The chemical composition, fineness, specific weight of cement and pozzolan were analyzed. In addition, the mechanical behavior, the consistency and the start and end of setting of the mortar were studied for the two types of pozzolan: red and black.

The results show that the quantity of pozzolan addition influences the mechanical resistance in compression and flexion of the mortars and this for both pozzolans, in addition the black pozzolan gives better resistance which is close to the standard mortar compared to the red one.

Key words: natural pozzolan, mechanical resistance, consistency, setting time.

ملخص

يعد استعمال الإضافات الإسمنتية في صناعة الإسمنت من أحدث الطرق الحصرية في إنتاجه. لأنها تحسن الخواص الميكانيكية وتنقص استهلاك الكنكر مما يؤدي إلى تقليص مشاكل البيئة.

الهدف من عملنا هذا هو استبدال جزء من الأسمنت بالبوزولان. وذلك بالنسب التالية: 0%, 10%, 20%, 30% من كتلة الإسمنت. ثم دراسة خواص وسلوك ملاط البوزولان.

تم تحليل التركيب الكيميائي والنعومة والوزن النوعي للأسمنت والبوزولان. بالإضافة إلى ذلك، تم دراسة السلوك الميكانيكي والتماسك وبداية ونهاية وضع الملاط لنوعين من البوزولان الأحمر والأسود.

أظهرت النتائج أن كمية البوزولان المستبدلة تؤثر على المقاومة الميكانيكية في الانضغاط والثني للملاط لكلا البوزولان، بالإضافة إلى أن البوزولان الأسود يعطي مقاومة قريبة للملاط المعياري مقارنة بالبوزولان الأحمر.

الكلمات المفتاحية: البوزولان الطبيعي، المقاومة ميكانيكية، التماسك، زمن الثبات.

Sommaire

| | |
|--|----|
| Résumé | 1 |
| Abstract | 2 |
| ملخص | 3 |
| Nomenclature | 8 |
| Liste des figures | 9 |
| Liste des tableaux | 11 |
| INTRODUCTION GENERALE..... | 12 |
| CHAPITRE I RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE | 13 |
| I.1 Les Mortiers | 13 |
| I.1.1 Composants du mortier | 14 |
| I.1.1.1 Le ciment | 14 |
| I.1.1.2 Les étapes de fabrication du ciment..... | 15 |
| • Extraction des matières premières | 15 |
| A) Concassage | 16 |
| B) Broyage et séchage | 17 |
| C) Préchauffage | 17 |
| D) Cuisson | 17 |
| E) Les phénomènes physico-chimiques au cours de la cuisson | 17 |
| F) Refroidissement du clinker..... | 18 |

| | |
|--|----|
| G) Broyage du clinker..... | 18 |
| H) Stockage et expédition..... | 19 |
| I.1.1.3 Les voies de fabrication de ciment..... | 19 |
| I.1.2 Les constituants principaux du ciment..... | 20 |
| • Les multiples ajouts cimentaires..... | 21 |
| I.1.3 Les types de ciment..... | 22 |
| I.2 Le Sable | 22 |
| I.3 L'eau de gâchage | 23 |
| I.4 Types de mortier | 23 |
| • Mortier de ciment | 23 |
| • Mortier de chaux..... | 23 |
| • Mortier bâtard | 23 |
| • Mortier réfractaire..... | 23 |
| • Mortier rapide | 24 |
| • Mortier industriel..... | 24 |
| I.5 Rôles et utilisations du mortier | 24 |
| I.6 La pouzzolane | 24 |
| I.6.1 Pouzzolane naturelle | 25 |
| I.6.2 Pouzzolane artificielle..... | 25 |
| I.6.3 La pouzzolane naturelle en Algérie | 25 |
| I.6.3.1 La couleur | 26 |

| | |
|--|-----------|
| I.6.3.2 La composition chimique..... | 26 |
| I.6.3.3 Caractéristiques physiques..... | 28 |
| I.6.3.4 Activité pouzzolanique | 28 |
| I.6.4 Effet de La pouzzolane | 28 |
| I.6.5 Propriété de la pouzzolane | 29 |
| I.6.6 L'utilisation de la pouzzolane | 29 |
| I.6.7 Réaction pouzzolanique | 30 |
| CHAPITRE II METHODOLOGIE EXPERIMENTALE..... | 32 |
| II.1 Matériaux et méthodologies d'essais..... | 32 |
| II.1.1 Matières premières | 32 |
| II.1.1.1 La pouzzolane..... | 32 |
| • Analyses chimiques des pouzzolanes | 33 |
| • Analyse granulométrique de pouzzolanes | 34 |
| • Caractéristiques physiques | 35 |
| II.1.1.2 Le ciment | 38 |
| II.1.1.3 Le sable naturel..... | 39 |
| II.1.1.4 L'eau de gâchage | 40 |
| II.1.2 Formulation des mortiers..... | 40 |
| II.1.2.1 Formulation des ciments..... | 40 |
| II.1.2.2 Mélanges de mortiers étudiés | 41 |
| II.2 Mesures expérimentale | 41 |
| II.2.1 Essai sur le ciment | 41 |

| | |
|--|----|
| 1) Détermination de la densité (la masse volumique absolue) | 41 |
| 2) Détermination de la finesse de ciment (NF EN 196-6) | 42 |
| II.2.2 Essai sur la pâte ciment | 43 |
| II.2.2.1 Essai de consistance normale..... | 43 |
| II.2.2.2 Détermination du temps de prise (NF P15-431, NF EN 196-3)..... | 44 |
| II.2.3 Essai sur mortier | 44 |
| II.2.3.1 Détermination de la résistance mécanique par essai de traction par flexion | 44 |
| CHAPITRE III RESULTATS ET INTERPRETATION | 48 |
| III. Résultats et analyse | 48 |
| III.1 Introduction | 48 |
| III.1.1 Influence de taux de pouzzolane sur la masse volumique (pour les deux types de pouzzolane) | 48 |
| III.1.2 Influence de taux de pouzzolane sur la consistance de la pâte de ciment | 49 |
| III.1.3 Influence de taux de pouzzolane sur le temps de prise | 50 |
| III.1.4 Influence de taux de pouzzolane sur la résistance à la compression..... | 51 |
| III.1.5 Influence de taux de pouzzolane sur la résistance à la flexion..... | 54 |
| CONCLUSION GENERALE | 57 |
| Références | 59 |

Nomenclature

K : Clinker.

S : Laitier de haut fourneau.

D : Fumée de Silice.

P : Pouzzolane naturelle.

Q : Pouzzolane naturelle calcinée.

V : Cendre volante siliceuse.

W : Cendre volante calcique.

T : Schiste calcinée.

L et LL : Calcaire.

CPO : Ciment Portland Ordinaire.

CEM 1 : Mortier témoin (0 % de pouzzolane)

CEM 2 : Mortier avec 10 % de pouzzolane

CEM 3 : Mortier avec 20 % de pouzzolane

CEM 4 : Mortier avec 30 % de pouzzolane

MPZN(R) : Mortier avec pouzzolane rouge

MPZN(N) : Mortier avec pouzzolane noire

Pzr : Pouzzolane rouge

Pzn : Pouzzolane noire

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I-1 : le mortier ----- | 14 |
| Figure I-2 : le ciment ----- | 15 |
| Figure I-3 : extraction des matieres premieres d'une carriere ----- | 16 |
| Figure I-4: zone de separation ----- | 17 |
| Figure I-5 : four de la cuisson ----- | 17 |
| Figure I-6 : le processus de fabrication du ciment ----- | 19 |
| Figure I-7 : image d'une section effectuee sur le clinker ----- | 21 |
| Figure I-8 : differents types de sable ----- | 23 |
| Figure I-9 : composition chimique des quatre pouzzolanes ----- | 26 |
| Figure I-10 : analyse comparative des teneurs en oxydes de pouzzolane de diverses origines | 27 |
| Figure I-11 : gel de c-s-h. ----- | 31 |
| | |
| Figure II- 1 : scories de la pouzzolane naturelle de beni-saf avant broyage ----- | 33 |
| Figure II- 2 : la poudre de la pouzzolane naturelle de beni-saf apres broyage ----- | 33 |
| Figure II- 3 : la distribution granulometrique cumulee des poudres de pouzzolanes ----- | 35 |
| Figure II- 4 : l'echantillon de pouzzolane ----- | 36 |
| Figure II- 5 : eprouvette graduee ----- | 37 |
| Figure II- 6 : recipient rempli de pouzzolane ----- | 38 |
| Figure II- 7 : le sable utilise ----- | 39 |
| Figure II- 8 : la distribution granulometrique de sable ----- | 40 |
| Figure II- 9 : l'equipement (permeabilimetre de blaine) ----- | 42 |
| Figure II-10 : l'equipement d'essai de consistance ----- | 43 |
| Figure II- 11 : preparation et stockage des eprouvettes ----- | 45 |
| Figure II- 12 : conservation des eprouvettes a l'air libre ----- | 45 |
| Figure II- 13 : les machines des essais mecaniques ----- | 46 |
| Figure III- 1 : la variation de la masse volumique apparente..... | 49 |
| | |
| Figure III- 2 : la variation de consistance en fonction de taux de pouzzolane | 50 |
| Figure III- 3 : la variation de temps de prise | 51 |
| Figure III- 4 : variation de la resistance mecanique a la compression en fonction du taux de pouzzolane rouge..... | 52 |

| | |
|---|----|
| Figure III- 5 : variation de la resistance mecanique a la compression en fonction du taux de pouzzolane noire. | 53 |
| Figure III-6 : variation de la resistance a la traction par flexion en fonction du taux de pouzzolane rouge..... | 55 |
| Figure III- 7 : variation de la resistance a la traction par flexion en fonction du taux de pouzzolane noire. | 55 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau I-1 : Composition chimique du CEM I..... | 15 |
| Tableau I- 2: Les principales phases du ciment | 18 |
| Tableau I-3 : Les types de ciment | 22 |
| Tableau I-4 : Analyse chimique comparative des teneurs en oxydes de pouzzolane de Béni-Saf..... | 27 |
| Tableau I- 5 : Propriétés physiques de pouzzolane de Béni Saf de différentes études | 28 |
| Tableau I- 6 : Effet de la pouzzolane à l'état durci | 29 |
| Tableau I- 7 : Les différentes utilisations de la pouzzolane | 30 |
| Tableau II- 1 : Analyse chimique de la pouzzolane rouge (PZR)..... | 33 |
| Tableau II- 2 : Analyse chimique de la pouzzolane noire (PZN)..... | 34 |
| Tableau II- 3 : Les recommandations ASTM C618 pour une pouzzolane naturelle..... | 34 |
| Tableau II- 4 : Distribution granulométrique de la pouzzolane rouge | 35 |
| Tableau II-5 : Caractéristiques physiques de la pouzzolane Rouge..... | 36 |
| Tableau II-6 : Caractéristiques physiques de la pouzzolane Noire | 36 |
| Tableau II-7 : Composition chimique du CEM-I 42 | 38 |
| Tableau II- 8 : Caractéristiques de sable de Oued Souf | 39 |
| Tableau II- 9 : Désignations et proportions des pâtes de ciment | 40 |
| Tableau II- 10 : Composition des mortiers..... | 41 |
| Tableau II-11 : Mode opératoire de la détermination de la masse volumique absolue..... | 42 |
| Tableau II- 12 : Mode opératoire de la détermination de la finesse..... | 43 |
| Tableau II- 13 : Mode opératoire de l'essai de consistance | 44 |
| Tableau II-14 : Mode opératoire de l'essai de flexion | 46 |
| Tableau II- 15 : Mode opératoire de l'essai de compression | 47 |
| Tableau III- 1 : La masse volumique apparente des mortiers..... | 48 |
| Tableau III- 2 : La consistance normale..... | 49 |
| Tableau III- 3 : Le temps de prise en minute | 50 |
| Tableau III- 4 : La résistance à la compression de la pouzzolane rouge..... | 52 |
| Tableau III- 5 : La résistance à la compression de la pouzzolane noire..... | 52 |
| Tableau III- 6 : La résistance à la flexion de la pouzzolane rouge..... | 54 |
| Tableau III- 7 : La résistance à la flexion de la pouzzolane noire..... | 54 |

INTRODUCTION GENERALE

Le secteur des matériaux de construction consomme de plus en plus d'énergie, pour cela, il a cherché à réduire les émissions de CO₂ par l'adaptation de nouvelles stratégies. L'approche de L'Agence Internationale de l'Energie et le Conseil mondial des entreprises pour le développement durable était basée sur l'utilisation de carburants de substitution et le remplacement du clinker par la pouzzolane qui a des propriétés physiques et mécaniques semblables au ciment mais avec un coût faible. [1]

Les additifs constituent l'une des dernières évolutions dans la production des matériaux cimentaires (mortiers et béton), puisque leur utilisation améliore les propriétés physicochimiques et mécaniques de ces derniers d'une part, et d'autre part, leur utilisation vise à réduire la consommation de clinker et diminuer les problèmes environnementaux de manière simple et économique.

L'étude expérimentale consiste à analyser l'effet de l'incorporation de pouzzolanes naturelles sur les propriétés mécaniques des mortiers de ciment ordinaire.

L'idée principale est de réaliser des mortiers avec différentes proportions de pouzzolane de différentes type (rouge et noire) afin de comprendre les limites d'utilisation de ces dernières et de comparer ce mortier avec un mortier ordinaire.

Les matériaux qu'on a employés sont : la pouzzolane de la carrière ENG Béni-Saf de Ain T'émouchent, le ciment CEM I 42.5 de Lafarge Sour El Ghozlane avec une classe de résistance 42.5MPa et un sable naturel.

Le mémoire a été organisé en trois chapitres consignés comme suit :

Le premier chapitre : Recherche bibliographique ou on parle sur le mortier, le ciment, le sable et la pouzzolane d'une façon générale.

Le deuxième chapitre : Méthodologie expérimentales

Le troisième chapitre : Résultats et interprétation

En dernier une conclusion générale.

CHAPITRE I

RECHERCHE

BIBLIOGRAPHIQUE

La recherche sur les compléments ou les alternatives du CPO peut être divisée en trois grandes catégories, tel que :

- Le ciment est remplacé partiellement par les pouzzolanes, qui donne naissance à un ciment composé (objet de notre travail) ;
- L'activation chimique de matériaux aluminosilicates, qui donne naissance aux ciments géopolymères ou matériau à activation alcaline ;
- Les ciments intermédiaires impliquant à la fois un remplacement du CPO élevé associé à une activation alcaline qui donne naissance à un ciment alcalin hybride.

Le domaine de la construction en Algérie est en pleine demande des différents genres de matériaux, notamment le ciment, donc les cimenteries Algériennes sont dans l'obligation d'augmenter leur capacité de production, en améliorant la qualité et réduire le coût. Afin d'atteindre ce but, elles doivent adopter de nouvelles stratégies liées avec les résultats de recherches basées sur l'augmentation des pourcentages d'ajouts de matériaux pouzzolaniques dans le ciment.

A cet effet, en analysant les ciments disponibles dans le marché Algérien, on constate que les matériaux pouzzolaniques naturels ne sont pas bien exploités dans la production du ciment malgré leur abondance (cimenterie de Béni Saf ne remplace que 15% en moyenne).

[2]

I.1 Les Mortiers

Le mortier est un facteur décisif dans la vie de l'être humain. Ce dernier s'est trouvé dans l'obligation d'inventer quelque chose de plus résistant et durable à cause des points faibles

des matériaux qu'il utilisait avant (l'argile, le bois, le bambou etc.)

On parler sur des généralités sur les mortiers, ses composants ainsi que ses différents types et leurs domaines d'applications.

Le mortier est un matériau de construction composé de ciment, d'eau, de sable, adjuvants, et parfois d'autres additifs. Les propriétés peuvent varier considérablement d'un mélange à un autre en fonction du : type et des proportions de matériaux utilisés, de la méthode de mélange et la mise en œuvre. [3]

Le mortier est un matériau de construction, indispensable en maçonnerie, résulte de l'assemblage de sable, d'eau et d'un liant hydraulique (ciment ou chaux). Des adjuvants peuvent être ajoutés à la composition. En durcissant, le mortier acquiert une solidité comparable à celle de la pierre. Sa principale différence avec le béton réside dans l'absence de gravillons [4]



Figure I-1 : Le mortier

I.1.1 Composants du mortier

I.1.1.1 Le ciment

Le ciment est le résultat d'un processus de broyage du clinker, qui est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium chauffés à une température de fusion de 1450 à 1550 °C.

Sa définition selon la norme NF P15-301 est décrite comme une fine poudre inorganique qui, lorsqu'elle est mélangée avec de l'eau, forme une pâte capable de durcir. Le ciment Portland est composé principalement d'un mélange de clinker, de gypse et d'ajouts minéraux. [5] [6]



Figure I-2 : Le ciment

Ci-dessous la composition chimique d'un ciment ordinaire :

Tableau I-1 : Composition chimique du CEM I

| Oxydes | CaO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | CaSO ₄ | H ₂ O | SO ₃ |
|---------------------|-------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| Composition % | 50-70 | 5-10 | 15-30 | 5-10 | 0-5 | 0-2 | 0-5 |
| Notation cimenterie | C | A | S | F | CS | H | S |

Le ciment possède la capacité unique de subir une hydratation et une solidification lorsqu'il est exposé à l'eau. Ce processus de transformation transforme la pâte liante initialement fluide en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. La solidification résulte de l'hydratation de composés minéraux spécifiques, notamment des silicates et des aluminates de calcium. Pour désigner la transition de la pâte de ciment d'un état fluide à un état solide, le terme « pâte de ciment durcissante » est employé. Le ciment anhydre ordinaire est composé de clinker Portland, de gypse et potentiellement de matériaux supplémentaires tels que des cendres volantes, du laitier granulé de haut fourneau, de la fumée de silice, des pouzzolanes naturelles, etc. [5]

I.1.1.2 Les étapes de fabrication du ciment

- **Extraction des matières premières**

La composition fondamentale des ciments modernes consiste en un mélange d'aluminates de calcium et de silicates, formés par la fusion de chaux (CaO) avec de la silice

(SiO₂), de l'alumine (Al₂O₃) et de l'oxyde de fer (Fe₂O₃). Les roches calcaires servent de source de chaux essentielle, tandis que les argiles fournissent l'alumine, la silice et l'oxyde de fer nécessaires. [5]

Les matières premières nécessaires à la production de ciment, notamment le calcaire, l'argile et la marne, sont des substances naturelles qui contiennent divers oxydes, dont l'oxyde ferrique Fe₂O₃. Les carrières servent de source de matières premières, qui sont ensuite extraites et transportées jusqu'à l'usine dans la majorité des cas. Compte tenu de l'importance du calcaire marneux dans la production de ciment, le site est idéalement situé à proximité d'une carrière cruciale pour ce matériau. Lorsqu'il s'agit d'extraire du calcaire dur, nous utilisons des explosifs, tandis que le calcaire mou nécessite une approche différente. Pour les tâches impliquant le terrassement, diverses machines telles que des bulldozers, des grattoirs, des excavatrices et des pelles sont utilisées. [5]



Figure I-3 : Extraction des matières premières d'une carrière

A) Concassage

Le concasseur réduit les matériaux à une taille maximale de 80 mm, brisant ainsi efficacement la roche. Pour déterminer la composition chimique optimale, un échantillonnage continu du matériau est effectué, ce qui permet ensuite de mesurer les quantités requises de divers additifs tels que l'oxyde de fer, l'alumine et la silice. Le transport de ces matériaux jusqu'à l'usine se fait généralement à l'aide de gros camions ou d'autres moyens appropriés. Après le processus de concassage, les matières premières sont transportées à l'aide de convoyeurs à bande. Le matériau est dans un premier temps stocké dans des réserves avant d'être transféré dans un hall de pré-homogénéisation. Dans cette salle, le matériau est organisé en couches horizontales empilées les unes sur les autres puis soulevées verticalement. [5]



Figure I-4: Zone de séparation

B) Broyage et séchage

Une fois que les matières premières ont subi un processus de séchage et de broyage jusqu'à obtenir une consistance fine. Par la suite, cette farine peut être soit directement introduite dans le four sous sa forme en poudre, soit d'abord transformée en granulés. [5]

C) Préchauffage

La farine est préalablement chauffée à environ 800°C dans un préchauffeur à grille ou à cyclones avant d'être introduite dans le four. [5]

D) Cuisson

La cuisson nécessite une grande quantité d'énergie. Une tuyère fournit la chaleur et peut utiliser divers combustibles tels que le gaz naturel, le fuel, le charbon et le coke de pétrole. [5]



E) Les phénomènes physico-chimiques au cours de la cuisson

- A 100°C : évaporation de l'eau libre.
- Entre 450 et 550°C : Evaporation de l'eau de constitution.
- A partir de 650°C : Formation des aluminates et ferrites de calcium.
- A partir de 700°C : Décomposition du calcaire.
- Vers 800°C : Formation du silicate bi calcique (2CaO, SiO₂) 'Bélite'.
- A partir de 1250°C : le silicate tricalcique appelé 'alite' commence à apparaître à partir de la chaux et de la Bélite.
- Entre 1200 et 1260°C : apparition du premier liquide.
- Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile (silicates d'alumine et d'oxyde de fer) se combinent avec la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et aluminates de chaux. [5]

Tableau I- 2: Les principales phases du ciment

| Composé | Composition | Abréviation |
|------------------------------|---|-------------------|
| Silicate tricalcique | 3CaO.SiO ₂ | C ₃ S |
| Silicate bicalcique | 2CaO.SiO ₂ | C ₂ S |
| Aluminate tricalcique | 3CaO.Al ₂ O ₃ | C ₃ A |
| Aluminoferrite tétracalcique | 4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ | C ₄ AF |

F) Refroidissement du clinker

À la fin du processus de cuisson en aval du four, le clinker qui en sort a une température comprise entre 1200 et 1450 °C et descend dans le refroidisseur. Le clinker subit un refroidissement par air dans le refroidisseur, provoquant la solidification des phases formées à des températures élevées (telles que les silicates de calcium et les aluminates). [5]

G) Broyage du clinker

Une fois déchargés du four et trempés, les grains de clinker prennent la forme de granulés dont la taille varie de quelques millimètres à quelques centimètres de diamètre. Cependant, ces granulés, à cette grossièreté, sont incapables de servir de puissant liant hydraulique. Par conséquent, le clinker doit être broyé pour atteindre des granulométries inférieures à 50 µm. Cette étape particulière revêt une importance capitale dans la production du ciment car elle facilite l'activation des propriétés physico-chimiques du matériau. [5]

H) Stockage et expédition

Pour 70 % de la production, la diversité des produits est stockée dans des silos puis transportée en grande quantité par route, rail ou fleuve. Les 30 % restants sont conditionnés en sacs avant d’être expédiés. La salle de contrôle de l’usine est animée par des pilotes qui supervisent les opérations via leurs écrans, qui leur fournissent toutes les informations nécessaires. Tout au long du processus de transformation des matériaux, des échantillons sont systématiquement collectés et soumis à des analyses minutieuses. [5]

Les étapes citées avant, sont très nécessaires pour la construction du ciment. L’une complète l’autre. On peut résumer le processus de fabrication du ciment dans le schéma suivant :

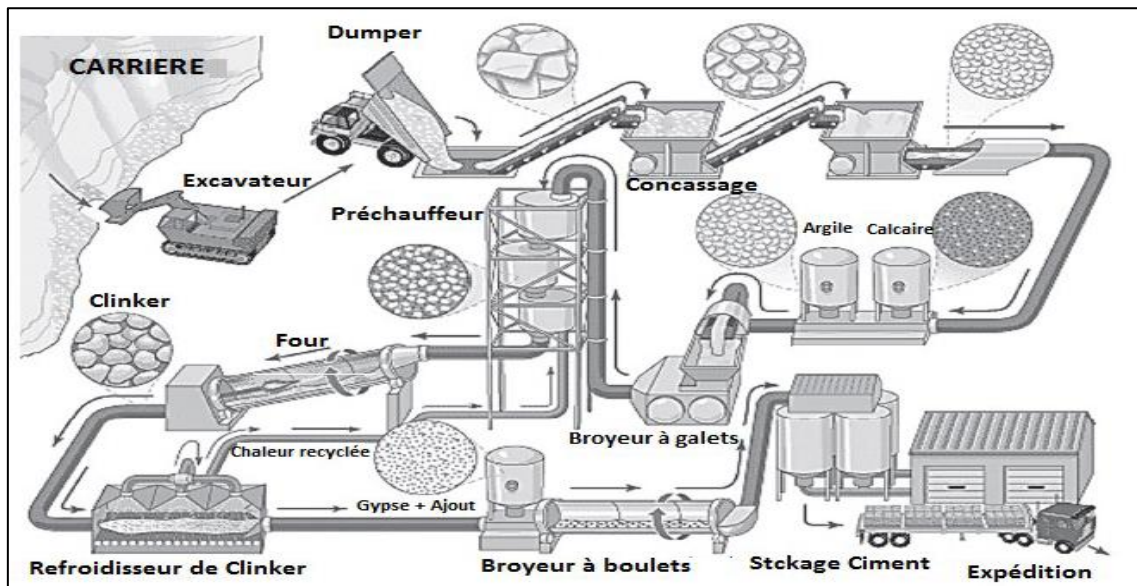


Figure I-6 : le processus de fabrication du ciment

I.1.1.3 Les voies de fabrication de ciment

On distingue deux voies principales pour la fabrication du ciment :

Voie Humide : consiste à broyer la matière première et à la combiner avec une quantité suffisante d'eau pour créer une pâte liquide. Bien que cette méthode soit simple et sûre, elle nécessite une quantité importante de carburant pour évaporer l’excès d’eau. C’est pourquoi nous privilégions la fabrication à sec. Le mélange mécanique a lieu dans de vastes cuves cylindriques en béton, permettant des ajustements chimiques de la matière première grâce à l’ajout de calcaire ou d’argile. Ces cuves s’assurent également la réalisation de l’homogénéisation finale. [5] [7]

Voie sèche : la matière première est d'abord séchée, puis finement broyée après avoir été mélangée et éventuellement corrigée chimiquement dans de grands silos équipés pour le mélange pneumatique. La forme pulvérulente du matériau est ensuite introduite dans le four.

[5] [7]

I.1.2 Les constituants principaux du ciment

- **Le clinker**

Le clinker est le produit obtenu de l'extraction du calcaire et de l'argile des carrières, à les broyer, à les homogénéiser. Ce mélange de matières premières composé de CaO, SiO₂, Al₂O₃ et d'oligo-éléments sous forme de farine brute, de pâte ou de bouillie est soumis à des températures élevées (1450°C) dans un four. Après refroidissement rapide. On obtient donc le produit nommé clinker.

Les majeurs éléments anhydres acquissent dans du refroidissement rapide du clinker :

- Le silicate tricalcique 3CaO.SiO₂ (C₃S) (50-70% du clinker).
- Le silicate bicalcique 2CaO.SiO₂ (C₂S) (10-30% du clinker).
- L'aluminate tricalcique 3CaO.Al₂O₃ (C₃A) (2-15% du clinker).
- L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tétracalcique) 4CaO. Al₂O₃.Fe₂O₃ (C₄AF) (5-15% du clinker).

Le clinker est constitué d'alcalis (Na₂O, K₂O), de magnésie (MgO) et de traces de divers métaux, soit sous forme de solution solide, soit dans des combinaisons complexes. Il est crucial de maintenir les niveaux d'alcalin et de magnésie à un faible niveau, car ces substances peuvent avoir un impact négatif sur la stabilité de l'illite dans le ciment durci. Grâce à des analyses microscopiques, les chercheurs ont identifié trois phases distinctes dans la structure minéralogique du clinker, qu'ils ont nommées ainsi :

a) Le principal composant du clinker de ciment Portland, représentant 50 à 70 % de sa composition, est l'alite, qui est une forme de silicate tricalcique (C₃S), est une phase cristallisée qui présente une réactivité rapide lorsqu'elle est exposée à l'eau. Cette phase minérale joue un rôle crucial dans la formation des hydrates clés qui contribuent aux caractéristiques mécaniques du ciment.

b) La phase vitreuse appelée Bélite représente 15 à 30 % du clinker et se présente sous une forme impure se présentant sous forme de grains légèrement arrondis et striés.

c) La célite, qui est la phase vitreuse légèrement foncée et claire des aluminates tricalciques, constitue 5 à 10 % du clinker de ciment CEM I. Elle a la capacité d'accélérer le processus de prise. Présent en grande quantité, il génère une chaleur importante lors de l'hydratation et

contribue à l'obtention d'une résistance mécanique initiale élevée du ciment. L'hydratation rapide du C_3A peut être régulée par l'ajout de sulfates (comme le gypse), ce qui ralentit le processus.

d) Les solutions solides de C_2A et C_4F , connues sous le nom d'alumino-ferrites de calcium, ressemblent beaucoup au C_4AF mais n'ont pas de composition chimique spécifique. Ces composés représentent environ 5 à 10 % du clinker du ciment CEM I, mais leur contribution aux réactions de durcissement du ciment est insignifiante. C'est la présence d'oxydes de fer qui confère la teinte grise distinctive à certains types de ciment. [5]

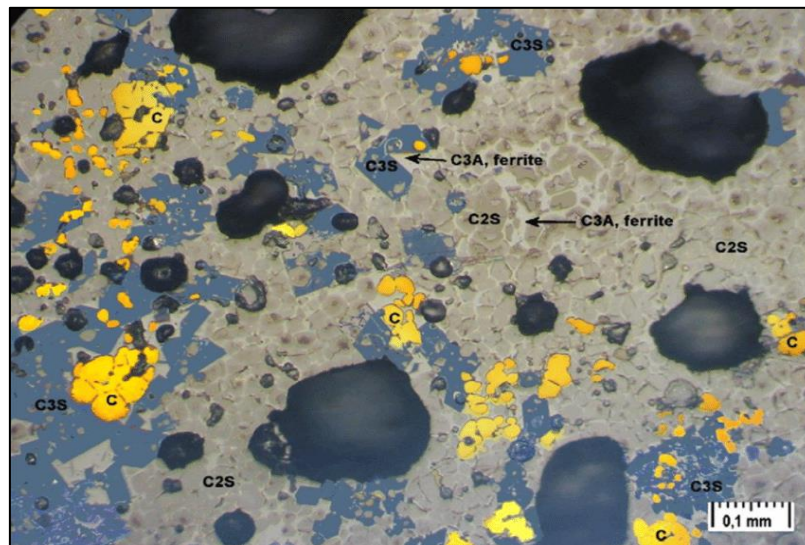


Figure I-7 : Image d'une section effectuée sur le clinker

- **Le gypse**

L'impossibilité d'utiliser du clinker « pur » très fin découle de ses temps de prise courts, généralement compris entre 3 et 5 minutes. Cette prise rapide peut être attribuée à l'hydratation rapide de la célite (C_3A), qui forme alors des hydrates compacts et cristallisés. Pour retarder la prise du ciment, il devient nécessaire de transformer les hydro aluminates de calcium en différents composés. Le gypse remplit efficacement cet objectif en réagissant énergiquement avec l'hydro aluminate tricalcique, entraînant la formation d'un sel insoluble appelé hydro sulfo-aluminate de calcium ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$). La quantité de gypse introduite doit correspondre à la teneur en C_3A présente dans le liant. Lorsque cette teneur en gypse est correctement maintenue, l'action initiale des hydro aluminates de calcium est effectivement stoppée. [5]

- **Les multiples ajouts cimentaires**

Les ciments composés, également appelés ciments additionnés, sont produits en incorporant divers éléments dans le processus de broyage du clinker. Ces éléments sont les cendres de centrales thermiques, les fillers calcaires et les pouzzolanes naturelles ou artificielles. L'inclusion de ces additifs donne naissance à différents types de ciments, répondant à un large éventail de projets de construction, du plus ordinaire au plus complexe. [5]

I.1.3 Les types de ciment

Les ciments à base de clinker et de composants secondaires sont classés en cinq grands types selon leur composition et selon les normes NF P15-301 et NF EN 197-1. Ceux-ci sont désignés CEM et sont numérotés en chiffres romains de 1 à 5 en notation européenne : [5] [6] [8]

Tableau I-3 : Les types de ciment

| Types de ciments | Clinker K% | Autres Constituants principaux S/D/P/Q/V/W/T/L/LL | Constituants secondaires % |
|-----------------------------------|---------------|---|----------------------------------|
| CEM I Ciment Portland | 95 – 100 | 0 | 0 – 5 |
| CEM II Ciment Portland Composé | 65 – 94 | 6 – 35 S/D/P/Q/V/W/T/L/LL | 0 – 5 |
| CEM II Ciment De Haut Fourneau | 5 – 64 | 36 – 95 Laitier | 0 – 5 |
| CEM IV Ciment Pouzzolanique | 45 – 89 | 11 – 55 D/P/Q/V/W | 0 – 5 |
| CEM V Ciment Composé | 20 – 64 | 26 – 80 S/P/Q/V | 0 – 5 |

I.2 Le Sable

Dans la formation du béton, le sable joue un rôle essentiel car il s’agit d’un composant fondamental. Son inclusion garantit la consistance granulaire essentielle qui permet une meilleure cohésion entre le ciment et le gravier. Constitué de particules issues de l'érosion des roches, le sable est une substance granulaire composée de quartz, de micas et de feldspaths.

Les grains de sable varient en taille, allant de 1/16ème de millimètre à 2 millimètres.

- La majorité des constructions utilisent des granulats naturels, tels que ceux provenant de la mer, de l'oued et du Sahara.
- Dans certains cas, on utilise des granulats de concassage, obtenus par concassage de granulats de carrière ou, plus rarement, par le recyclage de déchets de construction.[3]



Figure I-8 : Différents types de sable

I.3 L'eau de gâchage

En principe, c'est la quantité d'eau requise pour assurer l'hydratation du ciment au même temps sa maniabilité. Si le mortier est trop rigide, il manquera d'uniformité et s'avérera difficile à appliquer en couches minces. A l'inverse, si le mortier est trop fluide, il posera des difficultés lorsqu'on tentera de l'appliquer en couches épaisses. [3]

I.4 Types de mortier

Il existe plusieurs types de mortier selon les propriétés physiques et chimiques et mécaniques souhaitées. Cette variance des types permet une vaste utilisation du mortier, parmi ces types on cite :

- **Mortier de ciment**

Ce type de mortiers de ciment se distingue par sa meilleure résistance à la compression et sa prise rapide. Cependant, il a une plus forte tendance au retrait. [3]

- **Mortier de chaux**

Décrit comme gras et crémeux : il durcit plus lentement que les mortiers de ciment [3]

- **Mortier bâtard**

Ce type de mortier résulte du mélange de ciment et de chaux, combinant ainsi les avantages des deux composants. Il offre une résistance mécanique intermédiaire entre le mortier de ciment et le mortier de chaux, tout en conservant une certaine souplesse et respirabilité. La chaux apporte une meilleure plasticité, réduisant le risque de fissuration par rapport au mortier de ciment pur, tandis que le ciment apporte une résistance accrue et une vitesse de durcissement plus rapide. [3]

- **Mortier réfractaire**

Le mortier réfractaire est fabriqué à partir de ciment fondu et utilisé pour sa résistance aux températures élevées dans la construction de cheminées et de barbecues. [3]

- **Mortier rapide**

Le ciment Prompt est utilisé pour réaliser un mortier de scellement rapide et résistant.

- **Mortier industriel**

Un mortier sec fabriqué à partir de composants bien sélectionnés est contrôlé en usine et est livré dans des sacs ordinaires. [3]

I.5 Rôles et utilisations du mortier

- * Garantir l'interconnexion et la cohérence des éléments de maçonnerie, assurant ainsi la solidité et l'unité de la structure.
- * En l'appliquant comme revêtements utilisable sur les surfaces exposées à l'air.
- * En l'utilisant comme un écran résistant à l'eau et à l'humidité.
- * Agir comme un ingrédient crucial dans le béton.
- * Renforcer des sols de fondation spécifiques grâce à des méthodes d'injection. [9]

Le mortier est un matériau essentiel dans le domaine de la construction, offrant une combinaison unique de propriétés qui le rendent indispensable à la réalisation d'ouvrages solides, durables et résistants. Sa polyvalence et ses performances en font un élément incontournable pour les professionnels du bâtiment et les bricoleurs.

I.6 La pouzzolane

La plupart des fabricants cherchent à obtenir des ciments exigeant pour leur confection un apport de plus faible d'énergie calorifique et mécanique et incorporent à cet effet toute une série de nouveaux produits naturels ou artificiels à caractère hydraulique ou pouzzolanique telles que les fumées de silices et les cendres volantes, cette opération permet, d'une part, d'élaborer des mortiers et béton durables et résistants en milieu agressif [1]

Certains chantiers en France, au Canada et aux USA utilisent ces ajouts, dans le béton, soit par addition (en faible quantités 10% maximum) soit par substitution (en quantités assez importantes jusqu'à 40%).

Les pouzzolanes naturelles sont des matières d'origine volcanique ou des roches sédimentaires ayant une composition chimique et minéralogique adéquates. Et leurs principales constitutions sont : la silice, d'alumine et de fer, et développent naturellement les propriétés pouzzolanique [10]

I.6.1 Pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle n'est pas un produit ordinaire. Elle provient du cœur des volcans ou des profondeurs des roches sédimentaires, essentiellement constituées de silice, d'alumine et de fer. Ce qui est intéressant, c'est qu'il n'a pas de structure cristalline : ses composants sont tous mélangés dans une phase amorphe. Cette texture unique lui confère une grande surface qui lui permet de réagir très rapidement avec la chaux produite lors de l'hydratation du ciment. A la place des cristaux détruits lors de cette réaction vient un nouvel ensemble formé de silice et d'aluminate de calcium hydraté, chargé d'assurer une haute résistance mécanique et chimique.

L'ASTM C 618 stipule que la pouzzolane doit être considérée comme des matériaux siliceux et alumineux dépourvus presque absolument de toute valeur liante, à moins qu'ils ne soient réduits en poudre fine avec de l'humidité ajoutée ultérieurement lorsqu'ils agissent chimiquement avec $CA(OH)_2$ à des températures ordinaires pour former des composés ayant des propriétés liantes. [5] [11]

Il existe plusieurs types de pouzzolanes naturelles. Ils varient selon la couleur.

I.6.2 Pouzzolane artificielle

Les pouzzolanes artificielles sont des matériaux essentiellement constitués de silice, d'alumine et d'oxyde de fer qui, après un traitement thermique approprié, possèdent des propriétés pouzzolaniques et sont issus de déchets. D'autres secteurs généreraient soit des résidus industriels comme des fers à repasser, des cendres de bois ou de charbon, soit des chutes de briques et de tuiles fabriquées avec de l'argile pure à des températures modérées ; ou des schistes cuits différents des déchets industriels à base de méta kaolinite.[5]

I.6.3 La pouzzolane naturelle en Algérie

Le gisement de Bouhamidi situé à 2,5 km de Béni Saf qui se présente sous forme d'une montagne El Kelcoul dont la cote absolue est de 236m couvre une superficie d'environ 200 km² et s'étend sur 30 km de cote entre Cap Oulassa au Nord et Cap de Sidi Mohamed Bel Ourdini au sud-ouest, malgré ça la pouzzolane est utilisée en faible quantités dans nos cimenterie (15%) alors que de nombreuses études réalisées sur ce matériau approuvent son revalorisation technique et économique.

Cette dernière se présente sous différentes couleurs et une large gamme de compositions chimiques qui varient d'une région à une autre, on va présenter les différentes variabilités, tel que : la couleur, la composition chimique, caractéristiques physiques et activation. [5]

I.6.3.1 La couleur

Les couleurs les plus abondantes de la pouzzolane sont rouges et noires, avec des teintes intermédiaires, quelque fois grise. Des études antérieures ont indiqué que les couleurs ne donnent pratiquement que des informations sur le degré d’oxydation du fer présent dans le matériau et n’affecte pas la parie silicatée.

Cependant des analyses chimiques ont été réalisées sur des pouzzolanes provenant de différentes sources dans le monde ont montré que la couleur dominante reste étroitement liée au rapport des pourcentages pondéraux des oxydes ferreux et ferriques FeO/Fe₂O₃. Alors le pré jugement que la pouzzolane noire présente une qualité médiocre que celle de pouzzolane rouge est dénué de tout fondement. La figure ci-dessous montre des travaux réalisés sur les propriétés chimiques et minéralogiques de la pouzzolane de Beni-Saf [12].

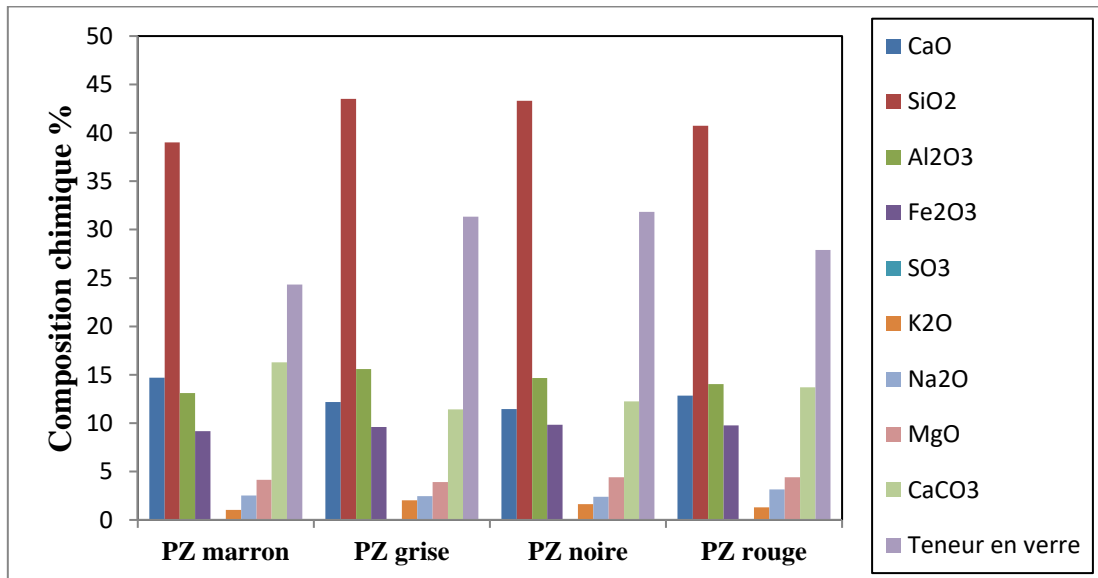


Figure I-9 : Composition chimique des quatre pouzzolanes [12]

I.6.3.2 La composition chimique

Plusieurs études ont été réalisées sur la pouzzolane de Béni-Saf en teneurs en oxydes, principalement la pouzzolane noire et grise (tableau I.4) et ses derniers ont été comparés par rapport à celle d’autre pays étrangers (figure I.10), en fonction des valeurs maximales et minimales données par les normes.

Les résultats montrent que la pouzzolane de Béni-Saf est très proche de sa composition chimique de celle de l’Arabie Saoudite et elle présente un taux élevé en oxyde de calcium et l’un des taux les plus élevés en oxyde de fer. [1]

Tableau I-4 : Analyse chimique comparative des teneurs en oxydes de pouzzolane de Béni-Saf

[13] [14]

| Elément/Etude | SiO ₂ | CaO | MgO | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | SO ₃ | Perte au feu |
|-------------------------|------------------|-------|------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------|
| [Belas et al., 2003] | 45.67 | 8.98 | 3.45 | 15.10 | 10.14 | 0.4 | 0.68 | 0.19 | |
| [Chabi et al., 2004] | 45.90 | 10.20 | 3.40 | 17.10 | 10.60 | 1.80 | 4.05 | 1.50 | 4.2 |
| [Ayed et al., 2012] | 56.25 | 9.83 | 1.81 | 16.98 | 8.57 | | | | 6.54 |
| [Ferhat et al., 2012] | 46.60 | 10.16 | 2.40 | 17.50 | 9.92 | 1.47 | 3.23 | 0.40 | 3.64 |
| [Belas et al., 2012] | 46.67 | 9.40 | 4.76 | 17.31 | 10.64 | 2.10 | 4.71 | 0.05 | 4.95 |
| [Nguyen et al., 2013] | 46.8 | 9.40 | 3.90 | 17.50 | 8.40 | 1.40 | 4.32 | 0.4 | 4.80 |
| [Ghomari et al., 2015] | 46.8 | 9.2 | 3.8 | 18.8 | 10.5 | 0.5 | 0.8 | 0.20 | 6.5 |
| [Ghrici et al., 2007] | 46.86 | 9.38 | 2.84 | 16.62 | 9.37 | 0.50 | 0.81 | 0.20 | 5.79 |
| [Senhadji et al., 2012] | 47.21 | 10.84 | 4.38 | 18.85 | 9.99 | 0.20 | 0.81 | 0.50 | 3.91 |
| [Deboucha et al., 2015] | 46.66 | 11.01 | 4.14 | 17.74 | 8.69 | 1.10 | 5.07 | 0.04 | 8.94 |
| [Merida et al., 2015] | 44.95 | 14.59 | 3.70 | 16.91 | 9.47 | 1.35 | 1.34 | 0.20 | 4.30 |

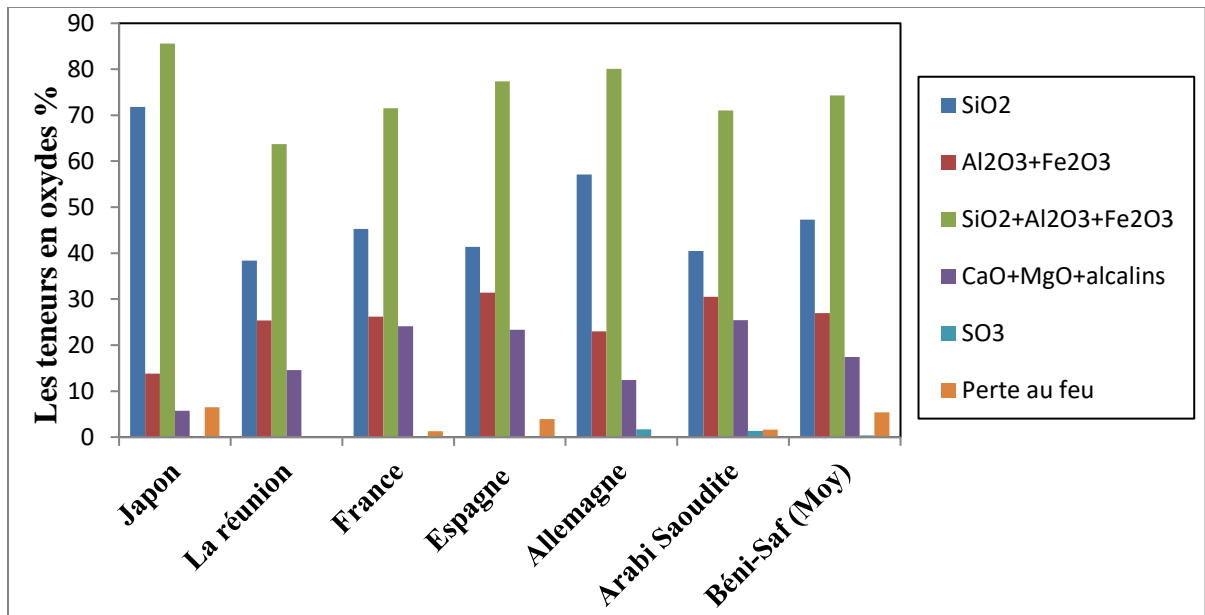


Figure I-10 : Analyse comparative des teneurs en oxydes de pouzzolane de diverses origines [13] [14]

I.6.3.3 Caractéristiques physiques

Le tableau I.5 montre les différentes valeurs de la masse volumique apparente et absolue ainsi que la surface spécifique Blaine des poudres de pouzzolane de Béni-Saf, tirées de différentes études. Ces valeurs montrent que les valeurs sont très proches avec un écart type très faible.

Pour la surface spécifique, on remarque qu'elle est supérieure à celle du ciment utilisé en Algérie (360 m²/kg), sachant que cette dernière varie en fonction du type de broyeur utilisé et le temps de broyage. [1]

Tableau I- 5 : Propriétés physiques de pouzzolane de Béni Saf de différentes études [13] [14]

| | Masse Volumique Apparente (g/cm ³) | Masse Volumique Absolue (g/cm ³) | Surface Spécifique Blaine (m ² /kg) |
|-------------------------|--|--|--|
| [Belas et al., 2003] | 0.95 | 2.85 | 450 |
| [Ghrici et al., 2007] | 0.98 | 3.07 | 359.8 |
| [Ghomari et al., 2015] | - | 2.85 | 390 |
| [Benaissa et al., 2012] | 0.98 | 2.75 | 356 |
| [Ayed et al., 2012] | - | 2.75 | 500 |
| [Senhadji et al., 2012] | - | 2.62 | 430 |

I.6.3.4 Activité pouzzolanique

Différentes méthodes ont été exposé afin d'améliorer l'activité pouzzolanique, tel que :

- L'essai d'absorption de la chaux proposé par Vicat ;
- Détermination chimique de la quantité de chaux fixée par le matériau pouzzolanique, c'est le test de Chapelle et l'essai de Fraottini ;
- Essai de chaux saturée ;
- Détermination de l'indice d'activité de résistance dans la norme ASTM C311.

I.6.4 Effet de La pouzzolane

• **A l'état frais**

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplée avec une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration. [5]

• **A l'état durci**

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très défavorable. [15]

Tableau I- 6 : Effet de la pouzzolane à l'état durci [15]

| Effet de la pouzzolane | |
|------------------------|---|
| 1 | Accroissement de la résistance finale |
| 2 | Légère diminution du retrait et du fluage |
| 3 | Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeur d'étanchéité |
| 4 | Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agression chimiques |
| 5 | Protection des armatures contre la corrosion |
| 6 | Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques |
| 7 | Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces exposées du béton |
| 8 | Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces |

I.6.5 Propriété de la pouzzolane

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux.

- **Propriétés hydrauliques**

La pouzzolane est capable de réagir en présence d'eau avec de l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stable, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [16]

- **Propriétés physiques de remplissage**

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

I.6.6 L'utilisation de la pouzzolane

Tableau I- 7 : Les différentes utilisations de la pouzzolane [17]

| | Utilisations |
|---|---|
| 1 | L'hiver, elle sert pour le sablage des routes verglacées |
| 2 | Dans les travaux publics elle est utilisée comme matériau de remblai léger, pour la réalisation du terrain de sport, piste d'athlétisme ; amendement terrains gazonnés, carrière à chevaux |
| 3 | Dans l'industrie en l'ajoutant au ciment, elle permet la confection de matériaux réfractaires comme les boisseaux de cheminées de parpaing de béton léger, très utile pour la construction de bâtiment, elle entre dans la fabrication d'argiles à tuiles |
| 4 | Elle possède des propriétés intéressantes pour l'isolation thermique et phonique |

I.6.7 Réaction pouzzolanique

La réaction pouzzolanique signifie formation dans la réaction de liaison. Les propriétés de la pâte qui contient les produits de réaction sont indépendantes de la réactivité pouzzolanique.

L'action pouzzolanique se caractérise donc par deux aspects distincts qui sont la quantité totale de chaux (la chaux utilisée est une chaux éteinte ayant pour formule chimique $CA(OH)_2$ (Portlandite ou hydroxyde de calcium) qu'une pouzzolane est capable de fixer ; et la rapidité de fixation de la chaux par la pouzzolane (la réactivité de la pouzzolane), cette réaction est lente c'est-à-dire se manifeste après 28 jours. [15] [16]

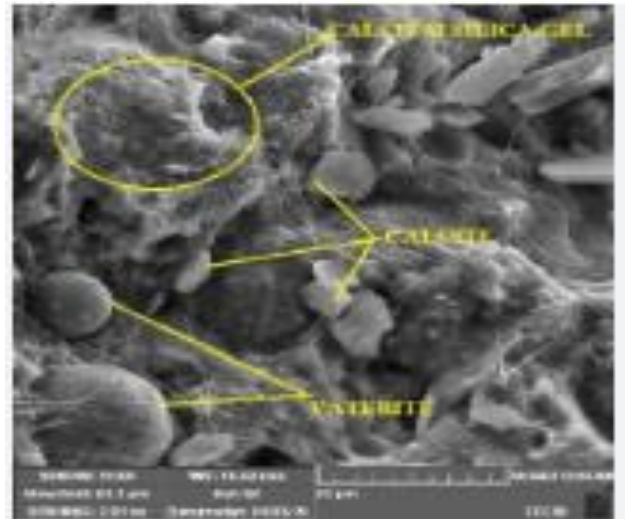
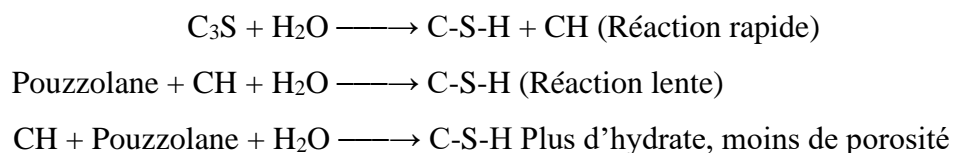


Figure I-11 : Gel de C-S-H.

Les pouzzolanes naturelles contiennent de 60 à 85% de silice (SiO₂) et d'alumine (Al₂O₃). En présence d'eau et de chaux, à des températures ordinaires, comme dit la norme ASTM C618, elles vont former des silicates de calcium hydratés, semblables à ceux produits par l'hydratation du silicate tricalcique (C₃S) (C₃A. SiO₂), composé principal du ciment Portland.

Les réactions pouzzolanique et hydraulique peuvent s'écrire globalement comme suit : [13]



Le comportement du ciment avec ajout se décrit par trois caractéristiques de la réaction pouzzolanique de l'ajout :

- a) Une lente réaction, de même pour le dégagement de chaleur et le développement des résistances.
- b) Contrairement au ciment Portland, la réaction pouzzolanique consomme la chaux et améliore la résistance du béton en milieu acide.
- c) Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons par affinage de ces pores capillaires et par transformation des gros cristaux de CH en un produit d'hydratation faiblement cristallisé (affinage des grains) [18]

CHAPITRE II

METHODOLOGIE

EXPERIMENTALE

Le travail expérimental a le but d'évaluer l'influence de l'incorporation de la pouzzolane sur le ciment.

Dans ce chapitre, on va présenter les caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection et la composition des mortiers. Sachant que ces derniers sont purement locaux :

- Le CEMI de la cimenterie de Sour El Ghoulane
- Sable naturel
- La Pouzzolane naturelle de Béni-Saf comme ajout
- Eau de robinet de la ville de Bouira

II.1 Matériaux et méthodologies d'essais

II.1.1 Matières premières

II.1.1.1 La pouzzolane

On a utilisé deux types de pouzzolane naturelle : la pouzzolane naturelle rouge et pouzzolane naturelle noire (figure II.1). Elles proviennent de la société Algérienne de pouzzolane et matériaux de construction (SPMC spa Béni-Saf) située au nord-ouest de l'Algérie. La pouzzolane brute a la forme d'un tuf basaltique foncé. Cette dernière a été maintenue dans un four à 50 °C pendant 24h pour la rendre plus facilement broyable en éliminant toute humidité. Ensuite, elle a été broyé et tamisé pour obtenir des particules dont la taille maximale est inférieure à 60µm. (figure II.2).

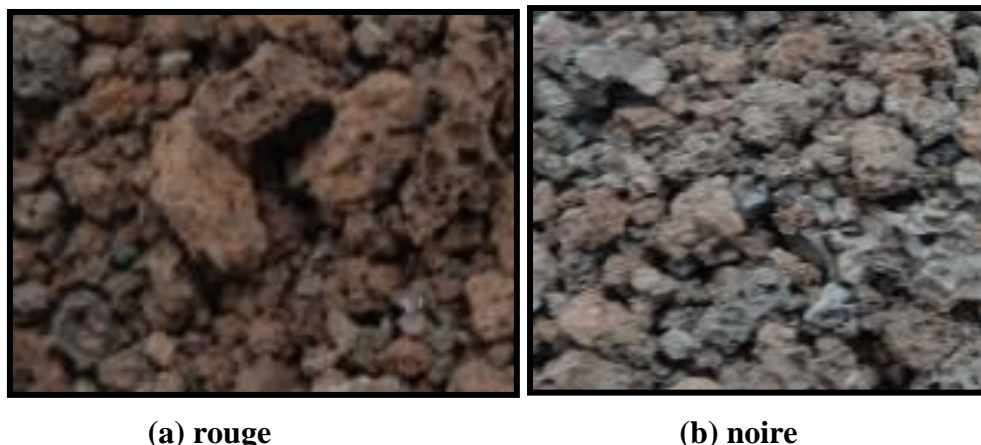


Figure II- 1 : Scories de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf avant broyage

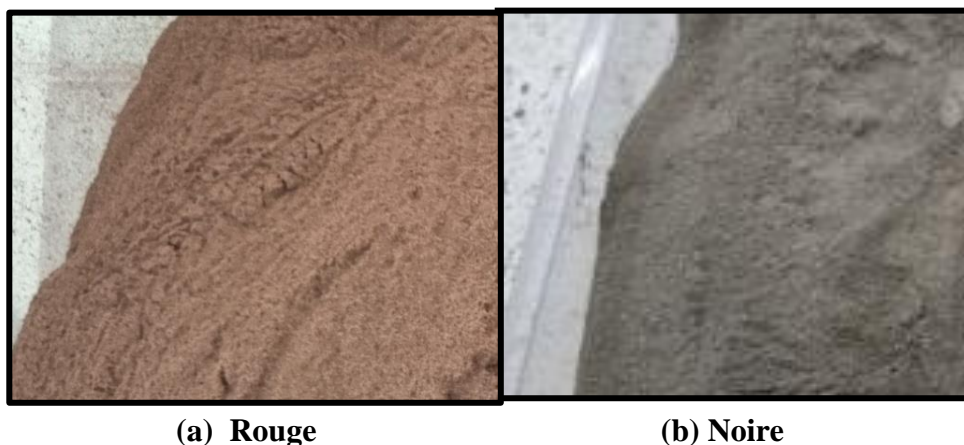


Figure II- 2 : La poudre de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf après broyage

- **Analyses chimiques des pouzzolanes**

Les analyses chimiques sont réalisées pour déterminer les teneurs des différents éléments chimiques, dosés sous forme de leurs oxydes. Ces analyses sont effectuées par fluorescence aux rayons X (XRF) au sein du laboratoire de la cimenterie de Sour El Ghozlane. Les résultats sont représentés dans les tableaux ci-dessous.

- **Analyse chimique de la pouzzolane rouge (PZR)**

Tableau II- 1 : Analyse chimique de la pouzzolane rouge (PZR)

| Composition chimique des matériaux | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O |
|------------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|-------|-----|-----------------|------------------|-------------------|
| Valeurs (%) | 46,72 | 16,54 | 9,67 | 10,49 | 5,6 | 0,05 | 1,49 | 6,12 |

- **Analyse chimique de la pouzzolane noire (PZN)**

Tableau II- 2 : Analyse chimique de la pouzzolane noire (PZN)

| Composition chimique des matériaux | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O |
|------------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|-------|-----|-----------------|------------------|-------------------|
| Valeurs (%) | 47,8 | 15,89 | 10,21 | 10,49 | 8,5 | 0,05 | 1,63 | 2,21 |

- **Les recommandations ASTM C618 pour une pouzzolane naturelle**

Tableau II- 3 : Les recommandations ASTM C618 pour une pouzzolane naturelle

| Composition chimique des matériaux | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O |
|------------------------------------|--|--------------------------------|------------------|------|-------|-----------------|------------------|-------------------|
| Valeurs (%) | 43-72 | 9-20 | 1-12 | 1-15 | 0,5-7 | 0-1,4 | 0,2-8 | 0,5-11 |
| | SiO ₂ +AL ₂ O ₃ +FeO ₃ | | | | | Min 70% | | |

De l'analyse chimique des deux pouzzolanes, on constate que 61,67 % (PZR) et 63,65 (PZN) de SiO₂ et Al₂O₃ avec un rapport molaire d'environ 3,13% (PZR) et 3,01% (PZN) élevé d'oxyde de calcium (10,49 %) qui peut contribuer à l'amélioration des propriétés mécaniques et donner une résistance à la compression plus élevée, mais reste inférieure à 20% ; il ne pouvait pas réagir et s'hydrater naturellement avec de l'eau et cela pour les deux pouzzolanes. La présence d'oxyde de fer (Fe₂O₃), avec un pourcentage relativement élevé pour les deux pouzzolanes par rapport à d'autres types.

- **Analyse granulométrique de pouzzolanes**

Les analyses granulométriques : tamisage à sec sur les fractions supérieures à 60µm (NF P94- 040) la poudre de pouzzolane est dispersée dans l'eau pour effectuer une analyse granulométrique. [19]

Tableau II- 4 : Distribution granulométrique de la pouzzolane rouge

| Tamis | Refus partiel (g) | Refus cumulé (g) | Refus cumulé (%) | Tamisat (%) |
|-------|-------------------|------------------|------------------|-------------|
| 6,3 | 0 | 0 | 0,00 | 100 |
| 5 | 0 | 0 | 0,00 | 100 |
| 4 | 0 | 0 | 0,00 | 100 |
| 2 | 0 | 0 | 0,00 | 100 |
| 1 | 0 | 0 | 0,00 | 100 |
| 0,5 | 30 | 30 | 10 | 90 |
| 0,25 | 86 | 116 | 38,66 | 61,34 |
| 0,125 | 108 | 224 | 74,66 | 25,34 |
| 0,063 | 65 | 289 | 96,33 | 3,67 |
| Fond | 11 | 300 | 100 | 0 |

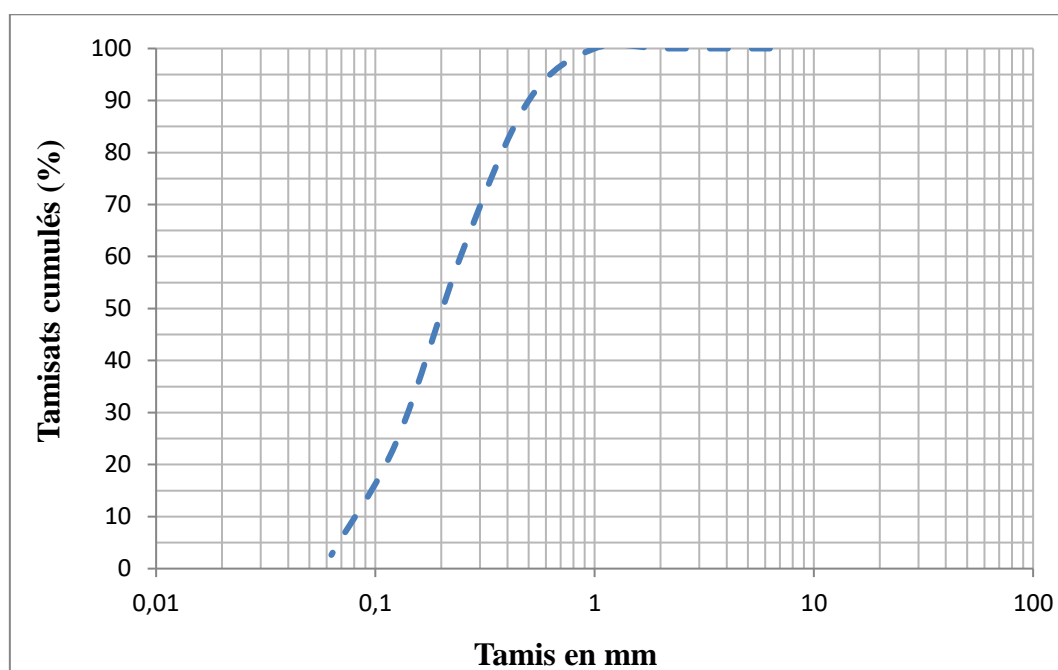


Figure II- 3 : La distribution granulométrique cumulée des poudres de pouzzolanes

- **Caractéristiques physiques**

La surface spécifique de Blaine, masse volumique apparente et la masse volumique absolue sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau II-5 : Caractéristiques physiques de la pouzzolane Rouge

| Caractéristiques physiques | Unités | Valeurs |
|------------------------------|--------------------|---------|
| Surface spécifique de Blaine | m ² /kg | 359,8 |
| Masse volumique absolue | g/cm ³ | 2,469 |
| Masse volumique apparente | g/cm ³ | 1,43 |
| Porosité | % | 40,46 |

Tableau II-6 : Caractéristiques physiques de la pouzzolane Noire

| Caractéristiques physiques | Unités | Valeurs |
|------------------------------|--------------------|---------|
| Surface spécifique de Blaine | m ² /kg | 477,6 |
| Masse volumique absolue | g/cm ³ | 2,76 |
| Masse volumique apparente | g/cm ³ | 0,96 |
| Porosité | % | 40,46 |

• **Détermination de la masse volumique absolue de la pouzzolane (NF EN 1097-6)**

1. Les matériaux utilisés

- Tube gradué d'un volume de 2000±20ml.
- Une balance avec une précision ±0.1g.
- Pouzzolane.
- Eau.
- Récipient vide.

2. Mode opératoire

-Déverser une quantité de pouzzolane dans l'eau pour se débarrasser des vides qui se trouvent à l'intérieur.

-Sécher l'échantillon dans une étuve pour qu'elle soit prête pour l'utilisation.



(a) Dans l'eau

(b) Séchage

Figure II-4 : L'échantillon de pouzzolane

- Prendre une éprouvette graduée et la remplir avec un volume d'eau $V_1 = 500$ ml.
- Verser une masse $M = 500$ g de pouzzolane à l'intérieur du tube et lire la valeur de nouveau volume V_2 . [20]

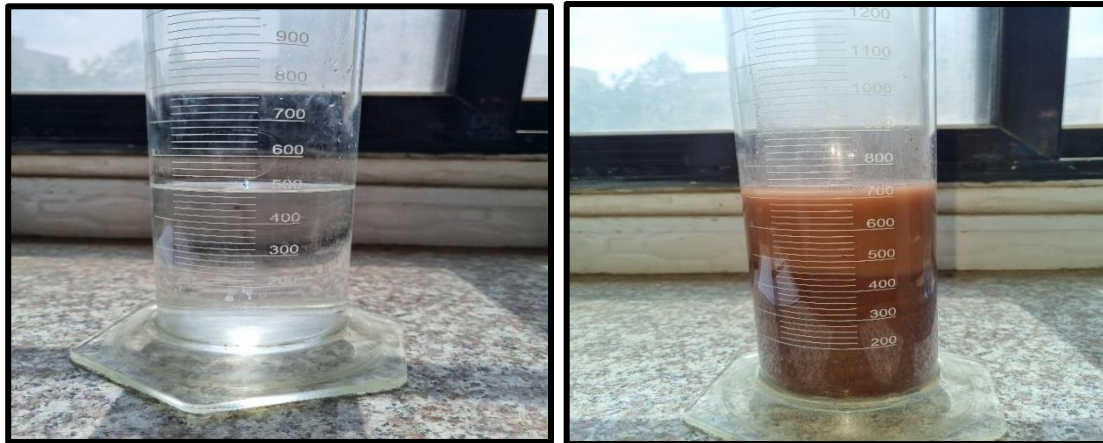


Figure II- 5 : Eprouvette graduée

- Calcul de la masse volumique absolue :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

Avec : M = Masse de la pouzzolane

V_1 = Le volume initial

V_2 = Le nouveau volume [20]

- **Détermination de la masse volumique apparente de la pouzzolane (NF EN 1097-3)**

1. Les matériaux utilisés

- Un récipient vide.
- Une balance.
- Une quantité de pouzzolane.
- Un récipient.

2. Mode opératoire

- Peser le récipient vide à l'aide d'une balance sa masse M_1 ,
- Prendre un échantillon de pouzzolane et remplir le vrac jusqu'à sa surface et on la rase sans pression pour ne pas dépasser le volume du vrac.

-Peser de nouveau le vrac rempli de pouzzolane en assurant bien de nettoyer les bords de ce dernier afin d'avoir des résultats exacts et noter sa masse M_2 . [21]



Figure II- 6 : Récipient rempli de pouzzolane

-La masse volumique apparente se calcule comme suit :

$$\rho_{\text{app}} = \frac{M_2 - M_1}{V}$$

Avec : M_2 : La masse du vrac avec celle de la pouzzolane ajoutée.

M_1 : la masse du vrac vide.

V : Le volume du vrac. [21]

II.1.1.2 Le ciment

Le ciment utilisé est un CEM-I 42,5 MPa, les résistances minimales garanties à 28 jours est de 42.5 MPa. De la cimenterie de Sour El Ghozlane, il est caractérisé par une finesse de 3675 cm^2/g et sa masse volumique absolue est de 3,13 g/cm^3 . Sa composition chimique est donnée dans le tableau II.7.

Tableau II-7 : Composition chimique du CEM-I 42

| Composition chimique (%) | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | P ₂ O ₅ | TiO ₂ |
|--------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|-------|------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|
| CEM-I42.5 | 20,96 | 5,14 | 3,68 | 63,82 | 2,69 | 1,96 | 0,79 | 0,176 | 0,163 | 0,235 |

II.1.1.3 Le sable naturel

Le sable utilisé est un sable naturel de nature siliceuse (70%) provenant de Oued Souf, la figure ci-dessous représente la courbe granulométrique de sable utilisé. Les caractéristiques de sable sont données dans le tableau II.8.



Figure II- 7 : Le sable utilisé

Tableau II- 8 : Caractéristiques de sable de Oued Souf

| Caractéristiques | Valeurs |
|--|---------|
| Masse volumique apparente kg/m^3 | 1812,05 |
| Masse volumique spécifique kg/m^3 | 2514 |
| Teneur en eau % | 0,4 |
| Equivalent du sable piston en % | 67,3 |
| Equivalent de sable visuel en % | 69,7 |
| Le bleu méthylène | 0,77 |
| Absorption | 0,48 |
| Porosité | 27,9 |

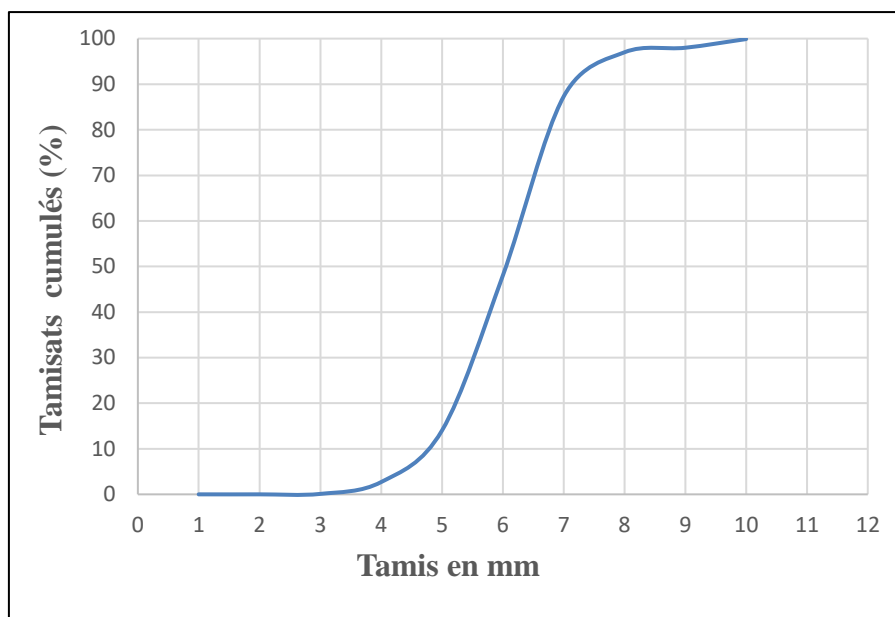


Figure II- 8 : La distribution granulométrique de sable

II.1.1.4 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la préparation des mortiers est une eau de robinet de la ville de Bouira.

II.1.2 Formulation des mortiers

Le mortier est constitué par le mélange suivant ;

- 1350 g±5g de sable naturel
- 450 g ±2g du ciment
- 225 g ±1g de l'eau de gâchage (le rapport eau/liant est de 0,52)

II.1.2.1 Formulation des ciments

Nous faisons varier le pourcentage de la pouzzolane dans le ciment par la méthode de substitution (remplacement partiel du ciment par pouzzolane) afin d'étudier son effet sur les propriétés et le comportement mécanique du ciment. L'incorporation de la pouzzolane dans le ciment (remplacement partiel en poids) à différents pourcentages : (0% ,10% ,20%, 30%). On obtient trois combinaisons de liants : CEM 2 (10% PZN), CEM 3 (20% PZN) et CEM 4 (30% PZN)

Tableau II- 9 : Désignations et proportions des pâtes de ciment

| | CEM 1 | CEM 2 | CEM 3 | CEM 4 |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| Ciment (%) | 100 | 90 | 80 | 70 |
| PZN (%) | 0 | 10 | 20 | 30 |

II.1.2.2 Mélanges de mortiers étudiés

Pour les mélanges étudiés, on a quatre séries de mortier ainsi obtenues sont désignées respectivement par :

- CEM1.
- CEM2.
- CEM3.
- CEM4.
- Chaque série comporte 6 éprouvettes prismatiques (3 pour la pouzzolane rouge et 3 pour la pouzzolane noire), le tableau ci-dessous représente la composition des mortiers pour les deux types de pouzzolane.

Tableau II- 10 : Composition des mortiers

| Composition | MT | MPZN(R) | | | MPZN(N) | | |
|----------------------------------|------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
| | | MPZN(R) | MPZN(R) | MPN(R) | MPZN(N) | MPZN(N) | MPZN(N) |
| | | 10 | 20 | 30 | 10 | 20 | 30 |
| Ciment (kg/m³) | 450 | 405 | 360 | 315 | 405 | 360 | 315 |
| PZ (kg) | 0 | 45 | 90 | 135 | 45 | 90 | 135 |
| Eau (l/m³) | 234 | | | | | | |
| Sable (kg) | 1350 | | | | | | |
| E/L | 0,52 | | | | | | |

II.2 Mesures expérimentale

II.2.1 Essai sur le ciment

1) Détermination de la densité (la masse volumique absolue)

La densité ou bien la masse volumique absolue est déterminée par pycnomètre à liquide. Le tableau II.11 résume le mode opératoire.

Tableau II-11 : Mode opératoire de la détermination de la masse volumique

| Détermination des différentes masses | | | | |
|--|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------|---|
| M ₁ | M ₂ | M ₃ | M ₄ | M ₅ |
| Pycnomètre vide | Pycnomètre rempli d'eau distillée | Pycnomètre et de toluène | Pycnomètre + ciment | Toluène rempli, éliminer les bulles d'air |
| Le volume du pycnomètre | | $V = \frac{m_2 - m_1}{\rho_{eau}}$ | | |
| La masse m _t de toluène remplacée | | $m_t = (m_2 - m_1) - (m_5 - m_4)$ | | |
| La masse volumique du liant | | $\rho_t = \frac{m_3 - m_1}{V}$ | | |
| Le volume de liant remplaçant le liquide | | $V_c = V_t = \frac{m_t}{\rho_t}$ | | |
| $\rho_{abs\ ciment} = \frac{m_4 - m_1}{V_c}$ | | | | |

2) Détermination de la finesse de ciment (NF EN 196-6)

La finesse d'un ciment est exprimée par sa *surface massique* : c'est la surface totale des grains de ciment par gramme de poudre. [22]

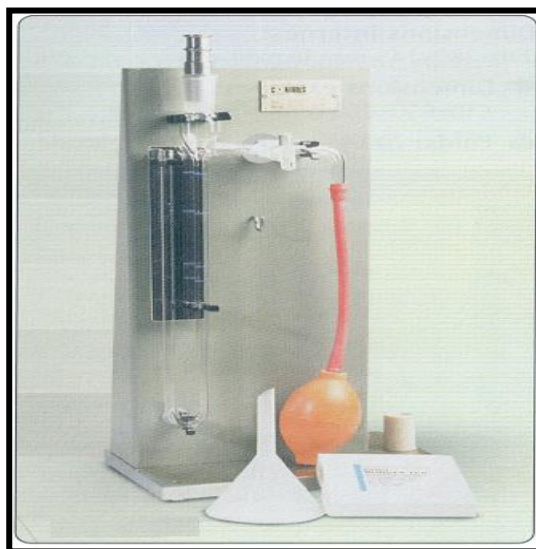


Figure II- 9 : L'équipement (perméabilimètre de Blaine)

La détermination de la surface massique s'obtient par l'une des deux méthodes, la méthode à porosité constante ou la méthode à masse constante.

La méthode à porosité constante est la méthode la plus utilisée, son mode opératoire est montré dans le tableau ci-dessous.

Tableau II- 12 : Mode opératoire de la détermination de la finesse

| Etapes | Manipulation |
|---|--|
| 1 | Placer la grille au fond de la cellule, appliquer sur cette grille au moyen d'une tige ou d'un crayon non taillé par exemple, un disque neuf de papier filtre |
| 2 | Par la méthode à porosité constante ($p = 0.5$) : peser à 0.01g près une masse "m" de liant telle que, une fois tassé dans la cellule de volume V, la porosité $p= 0.5$, $m = p \times V \times (1 - p)$ |
| 3 | Verser le liant dans la cellule en utilisant l'entonnoir |
| 4 | Donner quelques légères secousses à la cellule pour niveler la couche supérieure du liant puis placer un autre disque neuf de papier filtre |
| 5 | Tasser avec précaution au moyen du piston (en évitant la remontée de la poudre au-dessus du papier filtre) jusqu'à ce que le collier vienne buter contre le haut de la cellule |
| 6 | Retirer le piston lentement en pratiquant une légère rotation alternative |
| 7 | Vérifier le niveau du liquide manométrique qui doit affleurer au trait inférieur |
| 8 | Enduire de vaseline la partie rodée de la cellule et la placer sur son ajustage en lui imprimant un léger mouvement de rotation pour répartir la vaseline |
| 9 | Le robinet étant ouvert, aspirer lentement au moyen de la poire l'air du tube jusqu'à ce que le niveau atteigne le trait supérieur puis fermer le robinet |
| 10 | Dès que le liquide commence à descendre, déclencher le chronomètre (sensible au 1/5 s) quand le niveau du liquide atteint le deuxième trait. Arrêter le chronomètre quand le liquide atteint le troisième trait. Noter le temps écoulé "t" ainsi que la température "θ" à 0.1°C près |
| 11 | Faire trois mesures et prendre la moyenne arithmétique des trois temps |
| <p>La surface massique du ciment : $S = k \cdot \frac{\sqrt{P}\sqrt{t}}{P \cdot (1-P) \cdot \sqrt{\eta}}$ cm²/g</p> <p>K : constante de l'appareil ; ρ : masse volumique absolue du ciment en g / cm³ p : porosité de la couche tassée ; η : viscosité de l'air à la température de la salle d'essai t : temp mesuré en secondes</p> | |

II.2.2 Essai sur la pâte ciment

II.2.2.1 Essai de consistance normale

La consistance d'une pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité. L'essai de consistance permet de déterminer la quantité d'eau optimale pour avoir la consistance de la pâte optimale dite consistance normalisée.



Figure II-10 : L'équipement d'essai de consistance

Tableau II- 13 : Mode opératoire de l’essai de consistance

| Etapes | Manipulation |
|---|---|
| 1 | Peser 500g ±1 de ciment et l’introduire dans la cuve du malaxeur |
| 2 | Ajouter une quantité d’eau (on commence par exemple par un rapport de masse eau/ciment E/C = 0.24 au ciment en un temps compris entre 5 et 10 secondes |
| 3 | Mettre le malaxeur en marche à vitesse lente pendant une minute puis à vitesse rapide pendant deux minutes. |
| 4 | Arrêter et démonter le batteur, recaler les parois et le fond du récipient de façon qu’aucune fraction de pâte n’échappe au malaxage |
| 5 | Remonter le batteur et reprendre le malaxage pendant deux minutes à vitesse rapide. |
| 6 | Avec la pâte ainsi préparée, remplir immédiatement le moule tronconique et araser la surface au moyen d’une truelle prenant appui sur le bord du moule |
| 7 | Mettre le moule dans l’appareil de Vicat et régler le niveau zéro lorsque la sonde est au contact du bord du moule |
| 8 | Centrer le moule dans l’axe de la sonde et la laisser descendre sans vitesse initiale |
| 9 | Lire la distance ‘‘d’’ donnant l’épaisseur de la pâte entre le fond du moule et l’extrémité de la sonde |
| Si $d = 6 \pm 1$ mm la consistance est la consistance normalisée | |
| Si $d \neq 6 \pm 1$ mm refaire l’essai en ajoutant ou diminuer l’eau suivant le cas | |

II.2.2.2 Détermination du temps de prise (NF P15-431, NF EN 196-3)

Le début de prise est déterminé à l'aide de l'aiguille de Vicat qui s'enfonce dans le moule tronconique rempli de mortier normal ou de pâte de consistance normale. Quand, l'aiguille s'arrête à une distance " d " du fond de moule : $d > 2.5$ mm. Et cela sous l'effet d'une charge de 1000 g (300 g pour une pâte normale), le début de prise est atteint. Le temps de fin de prise est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0.5 mm. [23] [24]

II.2.3 Essai sur mortier

II.2.3.1 Détermination de la résistance mécanique par essai de traction par flexion

- **Préparation des éprouvettes**

Les éprouvettes pour les essais sont confectionnés selon la norme NF P15-403, les moules sont sous forme prismatique (40x40x160 mm³). La mise en place des mortiers dans les moules est effectuée en deux couches qui subissent sur une table à chocs 60 secousses en 60 secondes par couche, ces derniers sont couverts de film plastique et stockés dans l’environnement de laboratoire sous une température de 20⁰C (figure II.11). Les éprouvettes sont démoulées après un jour et conservées à l’air libre, jusqu’au jour de l’échéance. [25]

Pour les mélanges sans pouzzolane, neuf (09) éprouvettes ont été confectionnées et testées à des échéances de 3, 7 et 28 jours en traction par flexion et en compression, ce qui a donné neuf (09) essais de flexion et dix-huit (18) essais de compression. Pour les mélanges avec

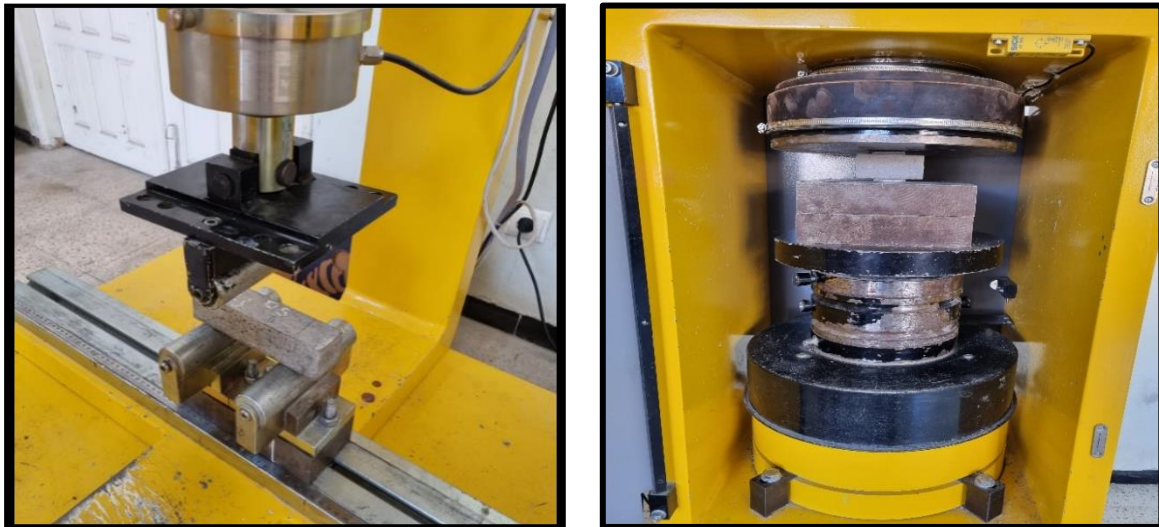
pouzzolane, nous avons confectionné et testé vingt-sept (27) éprouvettes, ce qui a entraîné l'ensemble de vingt-sept (27) essais de flexion et cinquante-quatre (54) essais de compression (figure II.12). Les machines utilisées sont montrées sur la (figure II. 13).



Figure II- 11 : Préparation et stockage des éprouvettes



Figure II- 12 : Conservation des éprouvettes à l'air libre



(a) Flexion 3 points

(b) Compression

Figure II- 13 : Les machines des essais mécaniques

- Le mode opératoire des deux essais est donné dans les tableaux II-14, II-15

Tableau II-14 : Mode opératoire de l'essai de flexion

| Étapes | Manipulation |
|--------|--|
| 1 | Glisser une éprouvette 4x4x16 cm ³ entre les appuis de l'appareil de flexion. Les faces latérales (lisses) de l'éprouvette doivent être en contact avec les appuis |
| 2 | Amener l'appui supérieur en contact avec la face supérieure de l'éprouvette |
| 3 | Appliquer la charge à vitesse constante |
| 4 | Relever la valeur de la charge de rupture ; soit "F" |
| 5 | Refaire la même opération pour les autres éprouvettes |
| 6 | $R_t = (1,5 \times F \times L) / d^3$ <p>R_t : Résistance à la traction en MPa F : Charge de rupture en MN L : Distance entre appuis inférieure en m d : Coté de l'éprouvette en m (a = 4. 10⁻² m)</p> |

Tableau II- 15 : Mode opératoire de l'essai de compression

| Etapas | Manipulation |
|--------|---|
| 1 | Placer le demi-prisme (obtenu à partir de l'essai de traction par flexion) de l'éprouvette 4x4x16 cm ³ entre les deux plateaux de la presse. Les face de l'éprouvette qui sont au contact de la presse doivent être planes et perpendiculaires à l'axe de l'éprouvette |
| 2 | Amener les plateaux en contact avec les faces de l'éprouvette |
| 3 | Appliquer la charge à vitesse constante |
| 4 | Relever la valeur de la charge de rupture ; soit "F _c " |
| 5 | Refaire la même opération pour les autres demi prismes |
| 6 | $R_c = F_c / S$ |

CHAPITRE III

RESULTATS

ET

INTERPRETATION

III. Résultats et analyse

III.1 Introduction

Après les travaux expérimentaux qui ont été réalisés, le but de cette partie est de présenter les résultats et les interpréter. A la fin de chapitre nous allons proposer une composition optimale du liant équivalent vis-à-vis de la résistance à la compression.

L'analyse de l'influence de la pouzzolane naturelle, est effectuée sur les propriétés physico-mécaniques de mortiers élaborés à partir de plusieurs liants, et cela pour les deux types de pouzzolane rouge et noire. Les mortiers étudiés sont composés des mélanges contenant du ciment, pouzzolane, sable et l'eau.

La préparation de différents mélanges pour les deux types de pouzzolane, nous a permis d'étudier une série d'essais physiques et mécaniques tels que : la densité, la consistance, le temps de prise, ainsi que la résistance mécanique à la compression et flexion.

III.1.1 Influence de taux de pouzzolane sur la masse volumique (pour les deux types de pouzzolane)

Les résultats du tableau III.1 et la figure III.1 montrent l'effet de la pouzzolane sur la densité de la pâte.

Tableau III- 1 : La masse volumique apparente des mortiers

| | MT (g/cm ³) | MPZ 10% (g/cm ³) | MPZ 20% (g/cm ³) | MPZ 30% (g/cm ³) |
|----------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 2jours | 2,161 | 2,155 | 2,148 | 2,156 |
| 7jours | 2,132 | 2,113 | 2,117 | 2,089 |
| 28jours | 2,113 | 2,101 | 2,097 | 2,105 |

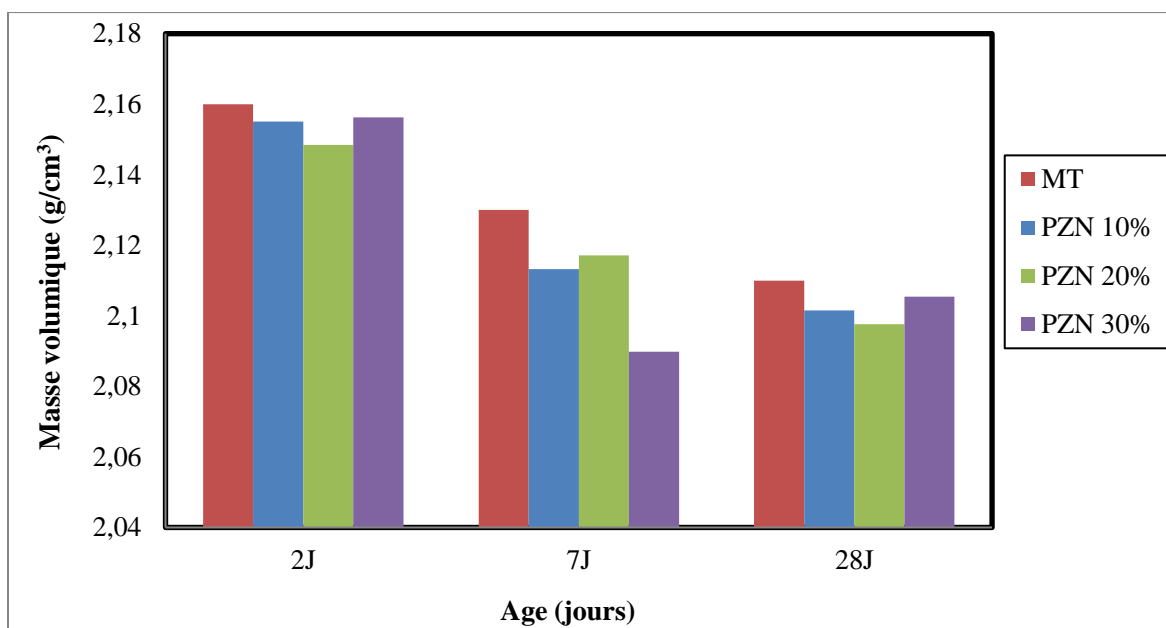


Figure III- 1 : La variation de la masse volumique apparente

En analysant les résultats donnés dans la figure ci-dessus, pour la variation de la masse volumique apparente en fonction de taux de substitution de pouzzolane avec l'âge, on constate une diminution de la masse volumique apparente, pour 7 jours et 28 jours la masse volumique apparente est diminuée de 2,9% et de 4,8% respectivement et cela pour le mortier témoin. Pour les taux de substitution égal à 10%, 20% et 30%, la diminution pour 7j et 28j est de 4,2% et 5,4%, 3,1 % et 5,1%, 6,7% et 5,1% respectivement. Cela est expliqué par le remplacement du ciment par la pouzzolane a une masse volumique apparente réduite (2.76 g/cm³, noire et 2,469 g/cm³, rouge) par rapport à celle du ciment (3.13 g/cm³).

III.1.2 Influence de taux de pouzzolane sur la consistance de la pâte de ciment

Le tableau III.2 et la figure III.2 représentent l'effet de la pouzzolane sur la consistance normale de ciment hydraté.

Tableau III- 2 : La consistance normale

| | Taux de pouzzolane | Le rapport E/(C+P) |
|-------------|--------------------|--------------------|
| CEM1 | 0% | 0,265 |
| CEM2 | 10% | 0,29 |
| CEM3 | 20% | 0,31 |
| CEM4 | 30% | 0,315 |

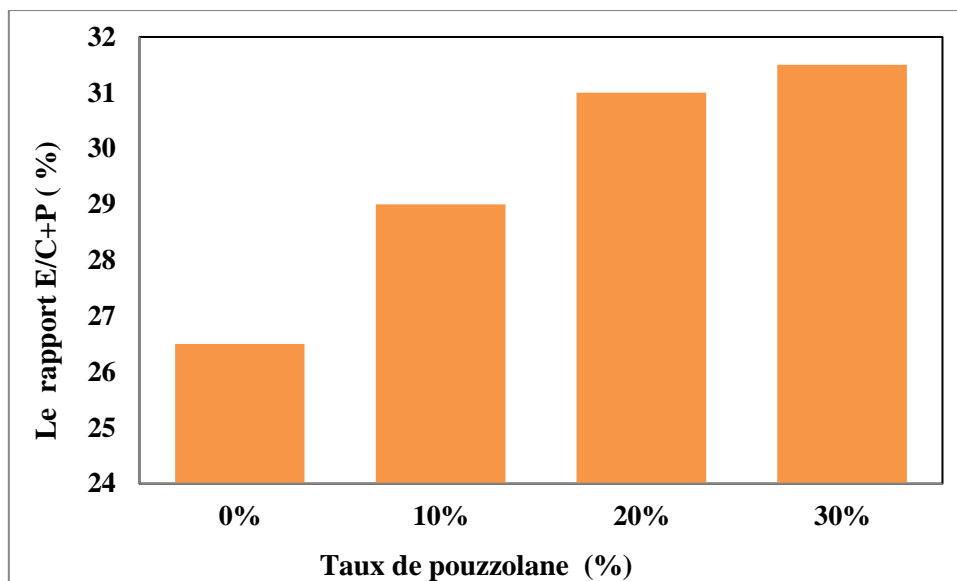


Figure III- 2 : La variation de consistance en fonction de taux de pouzzolane

On remarque d’après les résultats, que le rapport E/(C+P) est proportionnellement lié au taux de la pouzzolane dans le ciment, tel qu’il augmente de 2,5% pour un taux de 10%, 4,5% pour 20% et 5% pour 30% pour voir une pâte normale par rapport à la pâte témoin. Cela est expliquée par la grande surface spécifique de la pouzzolane (477,6 m²/g noire, 359,8 m²/g rouge), par rapport à celle du ciment (367,5m²/g), ainsi que les pourcentages de substitution du ciment par la pouzzolane.

En conclusion, Afin de garder une maniabilité constante des différents mélanges, on doit ajuster le rapport E/(C+P).

III.1.3 Influence de taux de pouzzolane sur le temps de prise

Dans le tableau III.3 et la figure III.3, on a la variation de temps de prise (début et fin) en fonction des différents mélanges.

Tableau III- 3 : Le temps de prise en minute

| | Taux de pouzzolane | Début de prise (DP) | Fin de prise (FP) |
|-------------|--------------------|---------------------|-------------------|
| CEM1 | 0% | 120 | 140 |
| CEM2 | 10% | 120 | 150 |
| CEM3 | 20% | 110 | 125 |
| CEM4 | 30% | 100 | 125 |

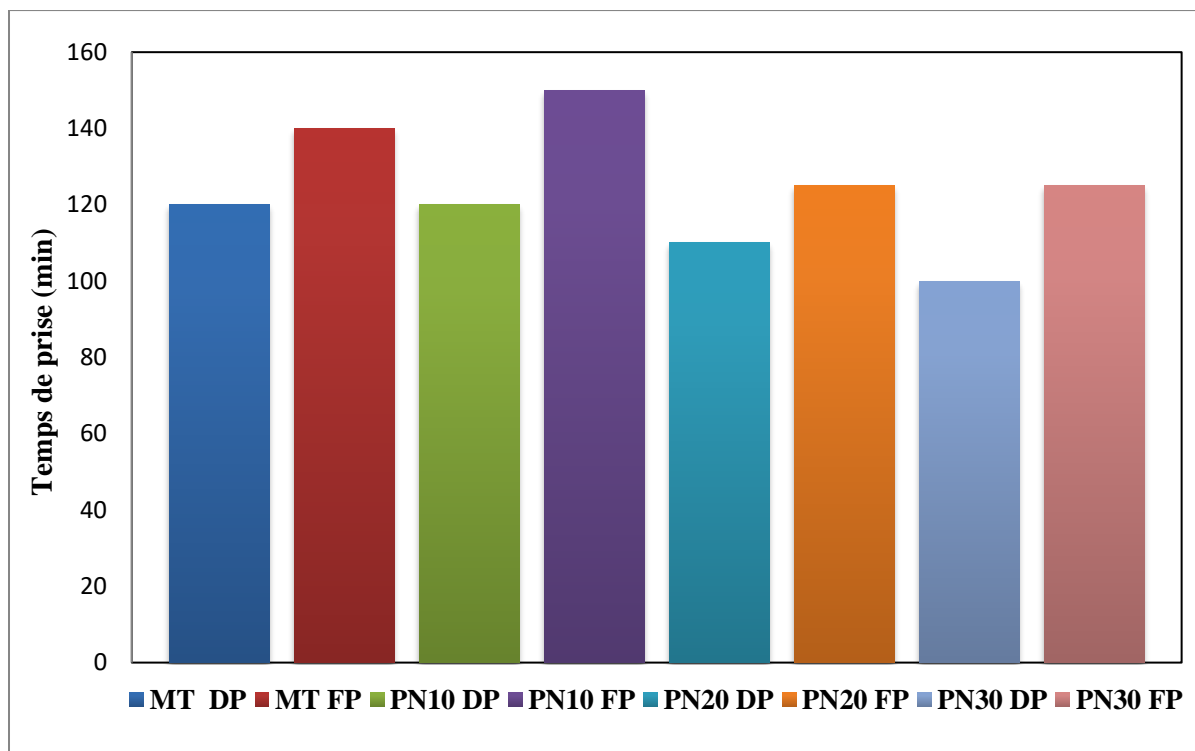


Figure III- 3 : La variation de temps de prise

Les temps de début et fin de prise sont mesurés pour les différents mortiers préparés et cela conformément aux normes. [24]

Le mélange contenant 10% de la pouzzolane présente une augmentation de 7 % dans le temps de fin de prise, on remarque que les pâtes avec 20%, 30% de pouzzolane présente une diminution de 11 %. Pour le temps de début de prise la pâte avec 10% de pouzzolane présente la même valeur avec le mortier témoin, par contre les autres avec 20% et 30% de pouzzolane présentent une diminution de 10% et 17% respectivement par rapport au mortier témoin. Donc on constate qu'au jeune âge, la prise est plus rapide pour le mortier témoin et pour le mortier avec 10% de pouzzolane, par contre pour CEM3 et CEM4, on remarque que la pouzzolane a retardé l'hydratation du ciment pour presque deux heures.

L'augmentation de temps de prise signifie que l'hydratation des ciments avec les additions minérales se déroule à des cinétiques différentes. Cette hydratation est légèrement plus complexe que celle d'un ciment Portland, en raison de la réaction pouzzolanique lente de la pouzzolane naturelle.

III.1.4 Influence de taux de pouzzolane sur la résistance à la compression

Le tableau III.4 et III.5 représentent les résultats expérimentaux de l'effet du taux pouzzolane sur la résistance à la compression pour les deux types de pouzzolane PZR et PZN.

Tableau III- 4 : La résistance à la compression de la pouzzolane rouge

| | Pouzzolane % | Rc2j (MPa) | Rc7j (MPa) | Rc28j (MPa) |
|-------------|--------------|------------|------------|-------------|
| CEM1 | 0 | 21,57 | 31,17 | 35,03 |
| CEM2 | 10 | 15,3 | 21,53 | 21,73 |
| CEM3 | 20 | 13,5 | 19,37 | 20,73 |
| CEM4 | 30 | 12,1 | 18,53 | 18,7 |

Tableau III- 5 : La résistance à la compression de la pouzzolane noire

| | Pouzzolane % | Rc2j (MPa) | Rc7j (MPa) | Rc28j (MPa) |
|-------------|--------------|------------|------------|-------------|
| CEM1 | 0 | 21,57 | 31,17 | 35,03 |
| CEM2 | 10 | 16,4 | 23,77 | 31,05 |
| CEM3 | 20 | 14,5 | 22,63 | 28,17 |
| CEM4 | 30 | 14,17 | 21,27 | 27,53 |

Les figures III-4 et III-5 illustrent l'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge de mortier témoin et ceux contenant la pouzzolane naturelle (10%, 20% et 30%). Elles montrent la variation de la résistance en fonction du pourcentage de substitution de la pouzzolane sur la résistance à la compression des mortiers aux différentes échéances.

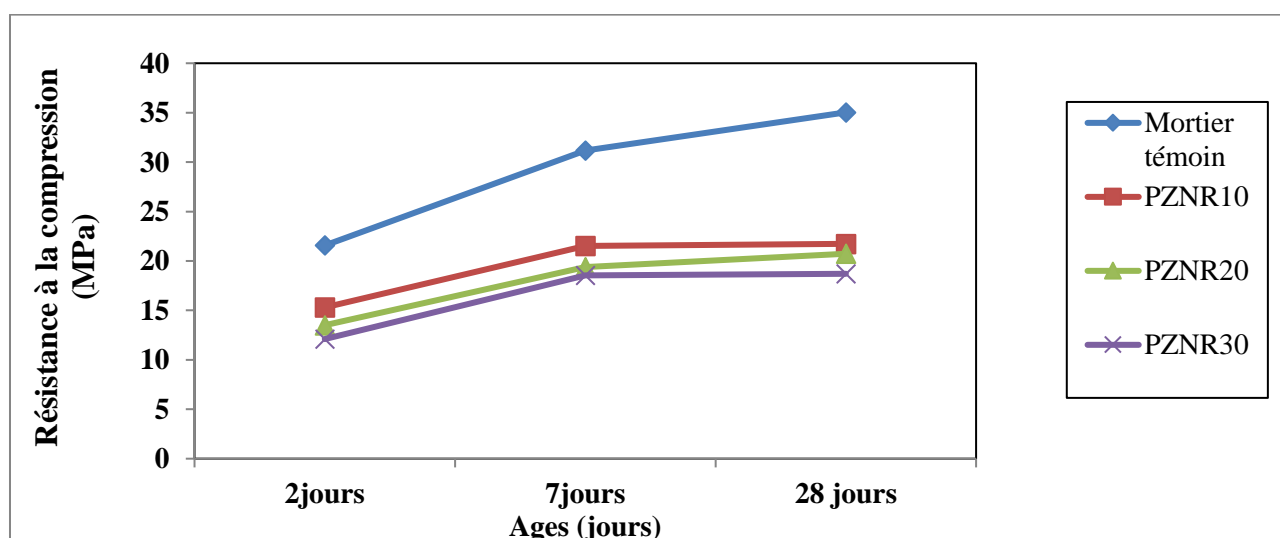


Figure III- 4 : Variation de la résistance mécanique à la compression en fonction du taux de pouzzolane rouge.

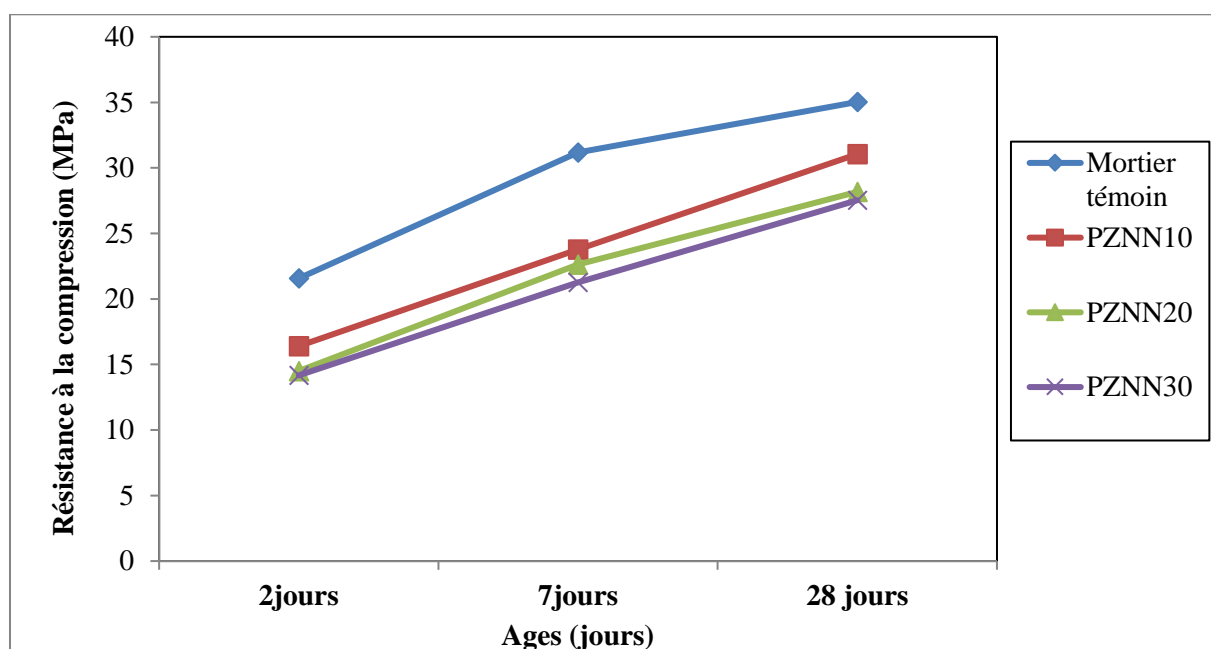


Figure III- 5 : Variation de la résistance mécanique à la compression en fonction du taux de pouzzolane noire.

D'après ces figures, nous remarquons que les résistances à la compression des mortiers élaborés avec les différents taux de substitution de la pouzzolane restent toujours inférieures à celle du mortier de contrôle et cela pour tous les âges et pour les deux types de pouzzolane.

Au jeune âge, l'augmentation du dosage de la pouzzolane a un effet négatif sur la résistance à la compression. En effet cette résistance diminue 29% à 44% à l'âge de 2 jours et d'un écart de 30% à 41% à l'âge de 7 jours par rapport à celle du témoin pour des dosages en pouzzolane allant de 10 à 30%. Cette diminution a tendance à augmenter et elle passe de 38% à 47% à l'âge de 28 jours, pour la pouzzolane rouge. Nous remarquons que le taux de pouzzolane influe sur la résistance : plus il augmente plus la résistance diminue.

Pour la résistance à la compression de la pouzzolane noire, à jeune âge, on constate la même chose que la pouzzolane rouge, l'augmentation de taux de dosage de la pouzzolane, conduit à la diminution de la résistance à la compression de 23% à 34 % à l'âge de 2 jours et de 24% à 32% à l'âge de 7 jours, mais cette diminution a tendance à diminuer à l'âge de 28 jours et passe de 11% à 21%. Ce qui met en évidence l'effet positif du taux de pouzzolane à long terme. Et on constate que le mortier avec 10% de pouzzolane noire donne une résistance très proche à celle du mortier témoin.

Chaib et al, dans leurs études ont trouvé une réduction de 15% de résistance à la compression à l'âge 28 jours d'un mortier contenant 20% de pouzzolane par rapport au mortier

témoin, avec les mêmes conditions de travail. Cependant, dans notre travail, nous remarquons que cette diminution est bien appréciée pour un taux de pouzzolane égale à 10%. [26]

C'est dû essentiellement au broyage de la pouzzolane très fin (des particules passant par un tamis de 60 µm), qui la rend plus active.

La résistance est faible au jeune âge, ceci peut être attribué aussi à l'activité pouzzolanique qui est lente au jeune âge et se développe à long terme en fixant la Portlandite Ca(OH)₂ libérée par l'hydratation du ciment Portland donnant naissance à des C-S-H supplémentaires de deuxième génération occupant un espace important de la matrice cimentaire et contribuant ainsi au développement de la résistance selon la littérature. [17] [18] [27] [28]

III.1.5 Influence de taux de pouzzolane sur la résistance à la flexion

Les résultats de la résistance à la flexion sont représentés dans les tableaux III.6 et III.7, et les figures III.5 et III.6.

Tableau III- 6 : La résistance à la flexion de la pouzzolane rouge

| | Pouzzolane % | Rt2j (MPa) | Rt7j (MPa) | Rt28j (MPa) |
|-------------|---------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| CEM1 | 0 | 3,34 | 4 | 4,9 |
| CEM2 | 10 | 2,77 | 3,03 | 3,33 |
| CEM3 | 20 | 2,37 | 2,7 | 3,23 |
| CEM4 | 30 | 2,03 | 2,83 | 2,33 |

Tableau III- 7 : La résistance à la flexion de la pouzzolane noire

| | Pouzzolane % | Rt2j (MPa) | Rt7j (MPa) | Rt28j (MPa) |
|-------------|---------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| CEM1 | 0 | 3,34 | 4 | 4,9 |
| CEM2 | 10 | 2,7 | 3,1 | 4,13 |
| CEM3 | 20 | 2,7 | 3,23 | 4,77 |
| CEM4 | 30 | 2 | 3,53 | 4,23 |

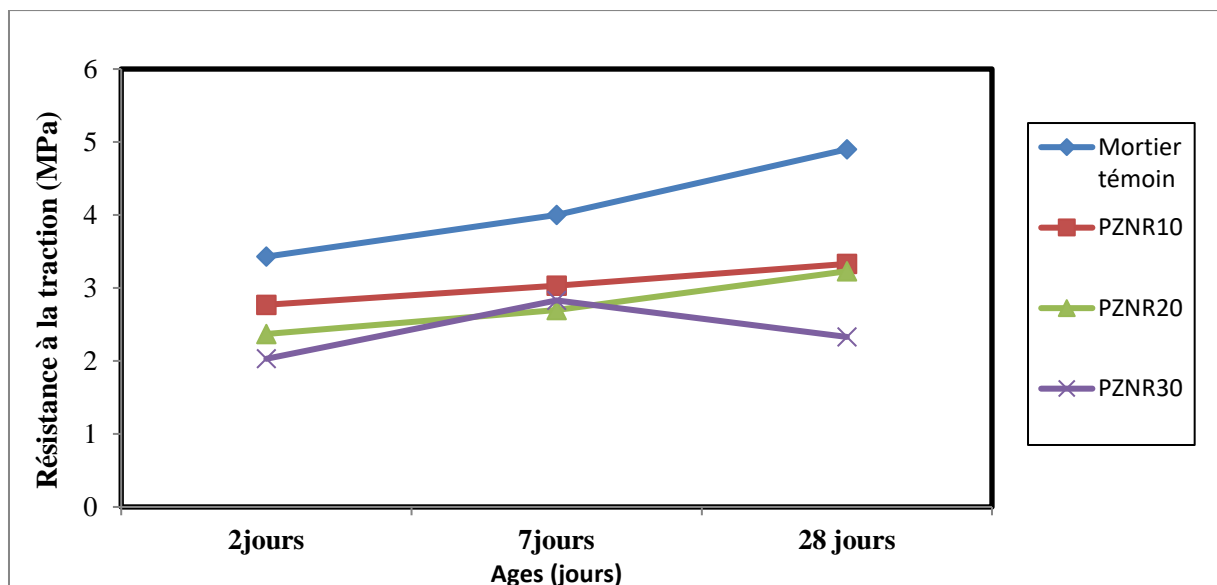


Figure III-6 : Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du taux de pouzzolane rouge.

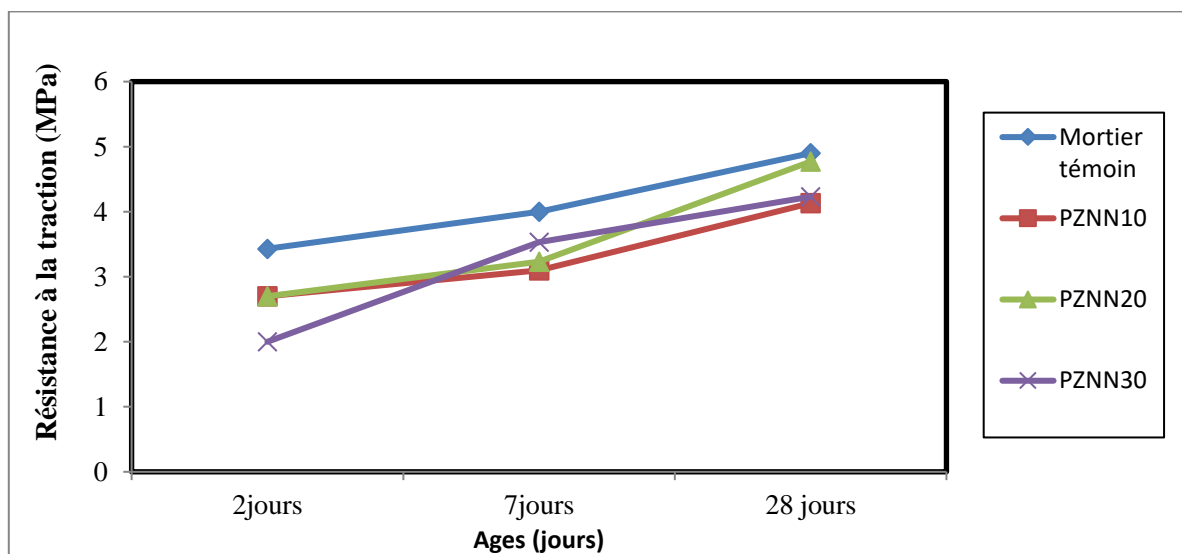


Figure III- 7 : Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du taux de pouzzolane noire.

D’après les résultats montrés, on remarque une réduction de la résistance des mortiers aux âges 2 et 7 jours au fur et à mesure que le taux de la pouzzolane accroît, pour les deux types de pouzzolane.

Cette réduction pour la pouzzolane rouge est de 17,06%, 29% et 39,22% à l’âge de 2 jours en comparant avec le mortier témoin, à l’âge de 7 jours est de 24,25%, 32,5% et 29,25% respectivement. A l’âge de 28 jours passe à 32,04%, 34,08% et 29,18%.

Pour la pouzzolane noire une diminution de résistance de 19%, 19% et 41% à l'âge de 2 jours en comparant avec le mortier témoin, à l'âge de 7 jours est de 22,5%, 19,25% et 11,75% respectivement. A l'âge de 28 jours passe de 15,71%, 2,65% et 13,67%.

On constate que, la résistance des mortiers avec substitution pouzzolanique par rapport au mortier témoin tend à décroître à long terme et d'une façon remarquable pour les mortiers à base de pouzzolane rouge, et un peu faible pour les mortiers à base de pouzzolane noire (mortier avec 20% présente une résistance à 28 jours proche à celle du mortier témoin). Cela peut être expliqué par la valeur de la finesse de la pouzzolane noire ($477,6 \text{ m}^2/\text{kg}$), qui engendre une plus grande réactivité par rapport à celle de la pouzzolane rouge ($359,8 \text{ m}^2/\text{kg}$).

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a porté essentiellement sur l'étude de l'influence du remplacement du ciment par la pouzzolane de Béni-Saf en comparant des types de pouzzolane rouge et noire, sur l'évolution des caractéristiques de ciment et les résistances mécaniques des mortiers.

Les résultats obtenus dans ce travail nous ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- La consistance est proportionnelle aux taux d'ajouts, plus le taux augmente plus la consistance augmente.
- La masse volumique apparente diminue, ce qui explique la bonne contribution de l'ajout pour la compacité ; et implique une bonne durabilité.
- L'accroissement de temps de prise signifie que l'hydratation des ciments avec les additions minérales se déroule à des cinétiques différentes. Cette hydratation est légèrement plus complexe que celle d'un ciment Portland, en raison de la réaction pouzzolanique lente de la pouzzolane naturelle.
- L'incorporation de la pouzzolane conduit aux faibles résistances mécaniques aux jeunes âges. Cette réduction est expliquée par la réaction pouzzolanique qui est ralentie au début de la réaction d'hydratation du ciment. Au moyen terme ces résistances commencent à développer des résistances assez importantes à cause du déclenchement de la réaction pouzzolanique retardé. Et cela pour un taux de pouzzolane de 10% la résistance à la compression s'approche de la résistance de référence.
- Au jeune âge, l'augmentation du taux d'ajout a un effet négatif sur la résistance à la compression, et à la flexion mais une fois l'âge devient important la résistance augmente.
- L'essai de prise effectué sur pâte pure et sur pâte de liant a confirmé un retard de prise conséquence de la floculation des grains. Aux très jeunes âges, cet effet se limite essentiellement à une décélération du processus d'hydratation.
- La pouzzolane noire donne de résistances mécaniques nettement supérieures à celle de la pouzzolane rouge. Car la finesse de la pouzzolane noire ($477,6 \text{ m}^2/\text{kg}$) est plus importante que celle de la pouzzolane rouge, qui engendre une plus grande réactivité par rapport à cette dernière.

Nous avons constaté que la pouzzolane conduit à une conservation des performances mécaniques. La substitution qui présente un intérêt économique, réduit la consommation de ciment et occasionne un gain de résistance.

Références

[1] : N. Goufi Nourredine 2019, « Activation chimique de produits pouzzolanique pour l'élaboration d'un nouveau ciment », thèse de doctorat. Université d'Oran

[2] : Hamid khelafi et al., « Influence chimique et physique de la pouzzolane sur la résistance en compression des mortiers », in *Algerie EQUIPEMENT* p1-5 (2000).

[3] : Mokhtar. N (2021). « Comportement Mécanique D'un Mortier De Ciment A Base De Fibre Végétale ». Mémoire Master. Université de Tizi Ouzou.

[4] : Tout sur le béton. Disponible à l'adresse URL : <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/les-mortiers-types-applications-dosages/> [en ligne] consulté le 05/04/2024.

[5] : AOUIDIDI. L (2016) : « Caractérisation d'un ciment à base De pouzzolane » Mémoire Master en génie civil. Université de M'sila.

[6] : NF P15-301 : norme française qui définit les caractéristiques des ciments courants.

[7] : Universalis. Disponible à l'adresse URL : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/ciment/2-fabrication-du-ciment/> [en ligne] consulté le 11/06/2024.

[8] : NF EN 197-1 norme européenne qui définit les caractéristiques des ciments courants.

[9] : ZANE. M et al (2019). « Elaboration et caractérisation d'un mortier léger par introduction de billes de polystyrène » Mémoire Master en génie civil. Université de Bouira.

[10] : J.M. GEOFFRAY, R. VALLADEAU : Morphologie et couleur des pouzzolanes. Bulletin de liaison des Laboratoires de ponts et chaussées-92-nov-déc, 1977- réf. 2116. pp91-94.

- [11] : ASTM C 618 : La Norme de Référence pour les Cendres Volantes et les Pouzzolanes Naturelles.
- [12] : Khelafi H et al., « Etude des matériaux cimentaires résistants aux agressions chimiques, influence de différentes additions minérales locales » Projet de recherche CNEPRU J04019201110016. 2012/2014.
- [13] : Setec lerm. Disponible à l'adresse URL : <https://doc.lerm.fr/pouzzolanicite-activite-pouzzolanique-et-hydraulicite/> [en ligne] consulté le 08/06/2024.
- [14] : BERRAIH M. : Etude des mortiers contenant de la pouzzolane naturelle et des déchets de verre (Mémoire de Magister- l'ENSET d'Oran-2010).
- [15] : A. MEBROUKI « influence de la pouzzolane de Beni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des mortiers » thèse de Magister- Université Mostaganem - juin 2003.
- [16] : Michel Vénuat, *La pratique des ciments mortier et bétons* « caractéristiques des liants des bétons mise en œuvre des coulis et mortiers » (chapitre 1). (1989)
- [17] : Hamdi B. (2019) « Influence du taux d'ajout de pouzzolane sur les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des ciments » Mémoire de Licence en génie chimie. Université de Bouira.
- [18] : T. Z. HARMATHY et L. W. ALLEN publication du 01-01-1974 de l'institut de recherche de la construction « CBD-140-F. Comportement thermique des murs de maçonnerie en béton sous l'action du feu ».
- [19] : NF P94-040 est une norme française qui s'intéresse spécifiquement à la caractérisation des sols.
- [20] : NF EN 1097-6 : granulats, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats : Méthode pour la détermination de la masse volumique spécifique.
- [21] : NF EN 1097-3 : granulats, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité inter granulaire.
- [22] : NF EN 196-6 : est une norme européenne qui spécifie les méthodes d'essai pour déterminer la finesse des ciments.
- [23] : NF P15-431 : est une norme française qui spécifie la méthode de détermination du temps de prise sur mortier normal.

[24] : NF EN 196-3 : Méthodes d'essai des ciments - Partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité.

[25] : NF P15-403 : définit les caractéristiques du sable normal et du mortier normal utilisés comme matériaux de référence dans les essais de ciments.

[26] : Feldman R.F et Cheng G.M « Hydration reactions in portland cement-silica fume blends » *Cement Concrete Res*, vol 15, pp 585-592 (1985).

[27] : Ghrici M. et al., « Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements » *Cement and concrete Composition* .vol 29, pp 542-549 (2007).

[28] : Khelladi S et al., « The Apparent Thermal Conductivity of Pozzolana Concrete » Article in *Physics Procedia*. vol 21, pp 59 - 66 (2011).

[29] : Mohamed S. M. et al., « Influence of calcined kaolin on mortar properties » *Constr Build Mater*. Vol 25, pp 2275-2282 (2011).

[30] : Siad H et al., « Influence of natural pozzolan on the behavior of self-compacting concrete under sulphuric and hydrochloric acid attacks, comparative study », Article in *ARABIAN JOURNAL FOR SCIENCE AND ENGINEERING* · pp 183-195 April 2010.

[31] : Youced S. (2021). « Comportement des bétons dans les milieux agressifs (cas de Biskra) » Thèse de doctorat en génie civil. Université de Biskra.