



Faculty of Sciences and Technology

Civil Engineering Department

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الهندسة المدنية

N° d'ordre : M2... /GC/2024

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie civil

Option : Structure

Thème

**Comportement mécanique des mortiers à base des
ajouts minéraux**

Présenté par :

BELKHERASSANE FATOUMA YAMINA

ALLILECHE HAMZA

Soutenu le 26/06/2024 devant le jury composé de :

Président : Mr MABROUKI Abdelkader Université de Mostaganem

Encadrant : Mr. BELARIBI Omar Université de Mostaganem

Examinatrice : Melle.GUERZOU Tourkia Université de Mostaganem

Année Universitaire 2023/2024

REMERCIEMENT

Au début, on souhaite adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

On tient à remercier mon encadreur de mémoire, Mr. BELARIBI OMAR, pour le temps qu'il a consacré à m'apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche. Son exigence m'a grandement stimulé.

Nous remercions beaucoup Mlle GUERZOU TOURKIA et Professeur MEBROUKI Abdelkader qui ont accepté de faire partie de notre jury, leurs critiques et conseils seront très utiles.

J'aimerais exprimer ma gratitude à tous les chercheurs et spécialistes, trop nombreux pour les citer, qui ont pris le temps de discuter de mon sujet.

Chacun de ces échanges m'a aidé à faire avancer mon analyse.

Ce mémoire n'aurait jamais pu voir le jour sans le soutien actif des membres de notre famille, surtout nos parents qu'ils nous ont toujours encouragé moralement et matériellement et à qui on tient à les remercier.

Enfin on tient à exprimer vivement nos remerciements avec une profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation, car un projet ne peut pas être le fruit d'une seule personne.

DEDICACE

A ma chère mère HOURIA

A mon père MANSOUR

*Dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines m'ont permis
de vivre ce jour.*

A mon frère et mes sœurs

AHMED, NADJIA, NOURIA

A tous les gens qui m'aiment surtout, mon encadrante de mon stage

BENAISSA.WAFAA

*Je remercie tous les enseignants qui m'ont aidée de près ou loin
pour la réalisation de cette étude.*

RESUME

Le sol algérien est riche en matériaux pouzzolaniques naturels, tels que la perlite naturelle, dans la région ouest plus précisément Hammam Bouhrara à Maghnia (Tlemcen). Malheureusement, ils ne sont pas encore totalement exploités. La perlite, grâce à ses composants chimiques en l'occurrence la silice et l'alumine qui lui procurent des propriétés intéressantes, s'octroie le privilège d'être utilisée comme un ajout minéral actif dans la production du ciment.

L'objectif de notre travail consiste en l'étude des effets de l'incorporation d'ajouts minéraux tels que : la perlite et la pouzzolane sur les propriétés mécaniques des mortiers élaborés selon des différentes combinaisons à base de ces ajouts. Ceci permettra de sélectionner les dosages optimaux pour le ciment binaire et les couples optimaux pour les ciments ternaires des mortiers, dont les comportements à l'état frais (consistance, maniabilité et prise) et à l'état durci (absorption capillaire et résistances mécaniques) ont été étudiés.

Les résultats tirés de ce travail de recherche confirment que le taux de substitution, du mortier ternaire (15% perlite + 5% pouzzolane) (M15/5), donne la meilleure résistance la à traction et à la compression à long terme.

Mots clé : Mortiers, Perlite, Pouzzolane, Absorption capillaire, Résistances mécanique.

ABSTRACT

The Algerian soil is rich in natural pouzzolanic materials, such as natural perlite, in the western region more precisely Hammam Boughrara in Maghnia (Tlemcen). Unfortunately, they're not yet fully exploited. Perlite, thanks to its chemical components, silica and aluminum, which give it interesting properties, has the privilege of being used as an active mineral addition in the production of cement.

The objective of our work consists of the study of the effects of the incorporation of mineral additions such as: perlite and pozzolana on the mechanical properties of mortars worked out according to various combinations' containing these additions.

The results of this research work confirm that the substitution rate, of ternary mortar (15% perlite + 5% pozzolan) (M15/5), gives the best resistance to traction and compression in the long term.

Keywords: Mortars Perlite, Pozzolana, Capillary absorption, Mechanical strength.

ملخص

تزرع التربة الجزائرية بالمواد البوزولانية الطبيعية مثل البيرلايت الطبيعي بالمنطقة الغربية وتحديدًا حمام بوغرارة بمغنية (تلمسان). ومن المؤسف أنها لم تستغل بالكامل بعد. يمنح البيرلايت، بفضل مكوناته الكيميائية في هذه الحالة السيليكا والألومينا التي تمنحه خصائص مثيرة للاهتمام، امتياز استخدامه كإضافة معدنية نشطة في إنتاج الأسمنت.

الهدف من عملنا هو دراسة تأثير دمج الإضافات المعدنية مثل: البيرلايت والبوزولان على الخواص الميكانيكية للمونة المنتجة وفق تركيبات مختلفة تعتمد على هذه الإضافات وهذا سيجعل من الممكن تحديد الكميات المثلى للأسمنت الثنائي والأزواج الأمثل للأسمنت الثلاثي للمونة، بما في ذلك السلوكيات في الحالة الطازجة (التناسق، قابلية التشغيل والتجمد) وفي الحالة الصلبة (الامتصاص الشعري و المقاومة الميكانيكية) وقد تمت دراستها.

تؤكد نتائج هذا البحث أن نسبة الاستبدال للمونة الثلاثية (15% بيرلايت + 5% بوزولان) (M15/5) تعطي أفضل قوة شد وضغط على المدى الطويل.

الكلمات المفتاحية المونة، البيرلايت، البوزولان، الامتصاص الشعري، المقاومة الميكانيكية.

Sommaire

RESUME

ABSTRACT

ملخص

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE	1
I.1. INTRODUCTION	3

PARTIE I

CHAPITRE I

I.1. CIMENT PORTLAND.....	3
I.1.1. Définition ciment portland	3
I.1.2. Historique.....	4
I.1.3. liant hydraulique (ciment)	4
I.1.4. Fabrication du ciment portland	5
I.1.5. Préparation de la matière première	5
I.1.6. Préparation du cru	6
I.1.7 Composition du cru	6
I.1.8. Broyage du ciment	6
I.1.9. durcissement du ciment portland et formation de sa structure.....	7
I.1.10. La calcination.....	8
I.1.11. Les différents ciments	8
I.1.12. Type de ciment	9
I.1.13. Propriétés principales	10
I.1.14. Utilisation du ciment portland.....	10
I.1.15. Les constituants du ciment.....	10
<i>I.1.15.1. Le clinker</i>	15
<i>I.1.15.2. Broyage du clinker</i>	15
<i>I.1.15.3. Le gypse $CaSO_4$</i>	15
I.1.16. Hydratation du ciment.....	13
<i>I.1.16.1. Période 1 : réaction initiales</i>	13
<i>I.1.16.2. Période 2 : période dormante</i>	13
I.1.17. Propriété technique du ciment portland	14

I.1.18. Emploi habituels.....	14
I.2. IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT (EMISSIONS DE CO ₂) :	15
I.2.1. Les niveaux d'émissions de CO ₂ de l'industrie cimentière	15
I.3. CONCLUSION	14

CHAPITRE II

II.1. INTRODUCTION	18
II.2. ADDITIONS MENIRALES	18
II.2.1. Définition	18
II.2.2. Utilisation des additions minérales en Algérie.....	19
II.2.3 Type aditions minérales	19
II.2.3.1 Additions de type I selon la norme EN 206-1	19
II.2.3.2 Additions de type II selon la norme EN 206-1.	20
II.2.4 Action des additions minérales sur les matériaux cimentaires..Erreur ! Signet non défini.	
II.2.4.1. Actions physiques	20
II.2.4.2. Action chimiques	20
II.2.5. Additions pouzzolaniques dans les cimenteries algériens	20
II.2.6. Classification des additions minérales.....	21
II.3. LA PERLITE	23
I.3.1. Réserves de perlite en Algérie	23
II.3.2. Gisement de la perlite Hammam Boughrara.....	24
II.3.2 Rôle de la perlite	25
II.3.3 Propriétés physique et chimiques de la perlite.....	25
II.3.3.1 propriété physique	25
1.légèreté	25
2.Structure poreuse	25
II.3.3.2 propriétés chimique.....	26
1.Composition	26
2.Stabilité	26
II.3.4. Utilisation de la perlite.....	27
II.4 POUZZOLANES NATURELLES	28
II.5. CONCLUSION.....	33

CHAPITRE III

III.1. INTRODUCTION	34
III.3. SYNTHESE DES ETUDES SUR PATES ET MORTIERS A BASE DE PERLITE	
III.3.1. Étude à l'état frais.....	37

III.3.2.3. Résistances à la traction des mortiers	41
III.4. SYNTHÈSE DES ÉTUDES SUR PÂTES ET MORTIERS À BASE DE POUZZOLANE NATURELLE	42
III.4.1. Étude à l'état frais.....	42
III.4.2.3. Résistances à la traction des mortiers	47
III.5. CONCLUSION	49

PARTIE II

CHAPITRE I : MATERIAUX UTILISES	51
I.1. INTRODUCTION.....	51
I.2. CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES :.....	51
I.2.1. Le ciment.....	51
I.2.2. La perlite.....	53
I.2.3. La pouzzolane naturelle.....	55
I.2.4. Le sable.....	57
I.2.5. L'eau de gâchage.....	59
I.2.6. L'adjuvant	59
I.3. CONCLUSION	60

CHAPITRE II : ESSAI

II.2.2. Essai de consistance normal	61
II.2.2.1. Objectif de l'essai	61
II.2.2.2. Principe d'essai	61
II.2.2.3. Équipement nécessaire	61
II.2.2.4. Conduite de l'essai	62
II.2.3.1. Objectif de l'essai	62
II.2.3.2. Principe d'essai	62
II.2.3.3. Équipement nécessaire	62
II.2.3.4. Conduite de l'essai	62
II.3.1.1. Formulation des mortiers	65
II.3.1.2. Préparation des mortiers	65
II.3.2.1. Essais d'absorption capillaire	72
II.3.2.2. Essais de résistances mécaniques	74
II.4. CONCLUSION.....	78

PARTIE III

CHAPITRE I : RESULTATS DE L'ESSAI DE CONSISTANCE DES PÂTES DE CIMENT	
I.1. INTRODUCTION.....	79

I.2. RESULTATS DE L'ESSAI DE CONSISTANCE DES PATES DE CIMENT	79
1.3. RESULTATS DE L'ESSAI DES TEMPS DE PRISE DES PATES DE CIMENT	80
I.4. MANIABILITE DES MORTIERS	82
I.5. CONCLUSION	83
CHAPITRE II : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT DURCI	84
II.1. INTRODUCTION	85
II.2. RESISTANCE A LA TRACTION	84
II.3. RESISTANCE A LA COMPRESSION	85
II.4. RESULTATS DE L'ESSAI D'ABSORPTION CAPILLAIRE	87
II.5. CONCLUSION	88
CONCLUSION GENERALE	89

INTRODUCTION GENERALE

La recherche d'un liant moins coûteux et écologique en utilisant des ajouts industriels et des ressources naturelles, dans l'industrie cimentaire est devenue une préoccupation majeure pour les technologues du domaine. Le ciment Portland ordinaire joue un rôle crucial dans l'industrie de la construction, car il consomme non seulement des ressources naturelles, mais entraîne également une augmentation significative des émissions de gaz à effet de serre. La production de ciment entraîne une émission importante de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, ce qui est préoccupant compte tenu de la demande croissante de ciment.

Toutefois, il est possible de diminuer les émissions de CO₂ en substituant une partie du ciment par des matériaux pouzzolaniques spécifiques. On outre, L'utilisation des ajouts cimentaires actifs à caractère pouzzolaniques font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés mécaniques, thermiques et durabilité des matériaux cimentaires à court et à long terme.

La perlite est un aluminosilicate roche volcanique, en raison de sa nature vitreuse et de sa composition chimique, cette perlite peut être utilisée comme ajout pouzzolanique

L'Algérie est l'un des pays qui possède une quantité appréciable de matériaux pouzzolaniques. Il possède un gisement important de perlite près de Hammam Boughrara situé au nord-ouest de la wilaya de Tlemcen et un autre gisement de pouzzolane à Béni-Saf, qui est très disponible dans l'Ouest de notre pays, d'où l'intérêt d'étudier ces roches comment des additions minérales. De nombreux travaux de recherches ont été récemment menés sur l'utilisation de la perlite dans le domaine du génie civil. Ces études ont porté sur la caractérisation physico chimique, mécanique et la durabilité, révélant la possibilité d'utilisation de cette perlite (substance d'origine volcanique) en tant qu'ajout cimentaire pouzzolanique. Plusieurs études ont fait l'objet de recherches poussées dans le but de revaloriser et la possibilité de substitution partielle du ciment par l'ajout pouzzolanique dans l'élaboration de pâtes, mortiers et bétons pouzzolaniques.

Notre objectif est d'étudier l'effet de l'incorporation des ajouts minéraux : perlite et pouzzolane naturelle sur les propriétés physique des pâtes de ciment et les caractéristiques physico-mécaniques des mortiers confectionnés à base de ciments binaires.

Ce travail est présenté en trois parties : une partie bibliographique, une partie expérimentale et une partie pour les résultats.

La première partie relative à la synthèse bibliographique est subdivisée à son tour en trois chapitres concernant l'état de connaissance. A la fin de cette partie, nous avons évoqué la problématique et l'objectif de notre étude :

- **Le chapitre I** Le premier chapitre comporte une recherche bibliographique sur le ciment portland, sa fabrication, les mécanismes hydratation ainsi que son impact environnementale (dégagement de CO₂).
- **Le chapitre II** Présentera une recherche bibliographique sur les ajouts minéraux actifs, la caractérisation et la classification des ajouts cimentaires pouzzolaniques d'origine volcanique dont la perlite et la pouzzolane sont les ajouts minéraux qui font l'objet de notre étude.
- **Le chapitre III** donne une synthèse des recherches sur les mortiers à base de perlite et de pouzzolane, il présente les différents résultats des essais à l'état frais et à l'état durci effectués par certains chercheurs. Il s'agit de l'essai de consistance, de prise, de maniabilité sur des compositions de mortiers avec perlite à l'état frais et des mesures d'absorption capillaire et les essais mécaniques de traction compression à l'état durci.

La deuxième partie consacrée à l'étude expérimentale, est constituée de deux chapitres :

- **Le chapitre I** décrit les matériaux qui ont été utilisés durant notre étude et l'identification des caractéristiques physico-chimiques de chaque matériau (ciments, perlite, pouzzolane, sable, adjuvant).
- **Le chapitre II** détaille des différents essais réalisés au cours de notre étude, ainsi que leurs modes opératoires (les essais sur pâtes de ciment, mortier à l'état frais et durci).

La troisième partie renferme les résultats et leurs analyses répartis sur deux chapitres :

- **Le chapitre I** est consacré aux résultats des essais sur mortier frais (essai de consistance (début et fin de prise) et la maniabilité).
- **Le chapitre II** concerne l'analyse des résultats des études à l'état durci (l'absorption capillaire et les essais mécaniques traction compression)

Enfin, nous achevons ce travail par une conclusion générale qui rappelle les synthèses des principaux résultats obtenus et des perspectives de recherche futures.

PARTIE I :

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I :
GENERALITES SUR LE CIMENT
PORTLAND

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE CIMENT PORTLAND**I.1. INTRODUCTION**

Le ciment portland est largement utilisé dans la construction pour fabriquer du béton et du mortier. Il est composé principalement de calcaire, d'argile et de minéraux. Son utilisation est essentielle dans la construction de bâtiments, de routes et d'ouvrages d'ingénierie en raison de sa force et de sa durabilité ; pour donner naissance à un matériau solide qui conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. [1]

Ce première chapitre bibliographique dresse un état de connaissances sur le ciment portland en étudiant leur différents types, leur fabrication leur constituants et leur hydratation.

I.1. CIMENT PORTLAND**I.1.1. Définition ciment portland**

Le ciment est un liant hydraulique qui durcie tant sous l'eau qu'à l'air. Il est obtenu en broyant très finement un mélange fritté de calcaire et d'argile, qui assure la prédominance dans le clinker de silicates de calcium. Le mélange fritté forme des grains dont les dimensions vont jusqu'à 40 mm et s'appelle clinker ; la qualité de celui-ci détermine les principales propriétés d'un ciment : résistance et rapidité de son accroissement, durée, stabilité dans les différentes conditions d'exploitation.

Les ciments portland CRS sont généralement conçus pour offrir une résistance élevée à la compression, une durabilité accrue et une capacité à résister à des conditions environnementales difficile. Ils peuvent être utilisés dans divers projets de construction tels que les routes, les ponts, les barrages, les fondations et d'autres infrastructures où la résistance et la durabilité sont des préoccupations majeures.



Figure I.1. Le ciment portland [CEM I]

I.1.2. Historique

Le ciment portland est le liant le plus important. Par sa production et son utilisation il occupe la première place parmi tous les liants. En 1970 sa production s'élevait en U.R.S.S. à 95,0 millions de tonnes, ayant sensiblement dépassé le volume de production des autres pays.

Dans la construction actuelle le ciment portland sert de liant principal ; il est largement utilisé pour le béton et le béton armé préfabriqué ou monolithe en construction industrielle, hydrotechnique, d'habitation, ainsi que pour la construction des routes.

Pendant la deuxième guerre mondiale et depuis, la pénurie puis le coût des combustibles a amené les fabricants à rechercher des ciments exigeant pour leur confection un apport, toujours plus faible, d'énergies calorifique et mécanique. D'où toute une série de produits nouveaux plus ou moins complexes dans la composition desquels la part du laitier et de divers autres constituants secondaires à caractère hydraulique ou à pouvoir pouzzolanique est sans cesse accrue, enfin plus récemment les nouvelles normes autorisent l'emploi d'agents de mouture lors du broyage final de la plupart des ciments, et l'utilisation de fillers parmi les constituants [2].

I.1.3. liant hydraulique (ciment)

Un liant hydraulique de ciment portland est un matériau utilisé dans la construction, principalement pour la fabrication de béton et de mortier. il est fabriqué à partir de clinker de

ciment, de gypse et parfois d'ajouts minéraux. Ce type de ciment durcit et prend sa résistance grâce à des réactions chimiques avec l'eau, ce qui lui confère des propriétés hydrauliques.

I.1.4. Fabrication du ciment portland

Le ciment portland est fabriqué essentiellement à partir de matière calcaires, comme le calcaire ou la craie (environ 80%) et à partir d'alumine et silice présent dans l'argile et schistes argileux (environ 20%).

Le procédé de fabrication du ciment consiste essentiellement à broyer des matières premières, à les mélanger dans certaines proportions puis à les cuire dans un four rotatif à une température atteignant environ 1450°C à laquelle le matériau fond partiellement jusqu'à former le clinker.

Le clinker est refroidi puis broyé en poudre fine, opération au cours de laquelle on ajoute le gypse (indispensable pour différer la prise) et des additions minérales éventuelles universellement utilisées dans le monde [3].

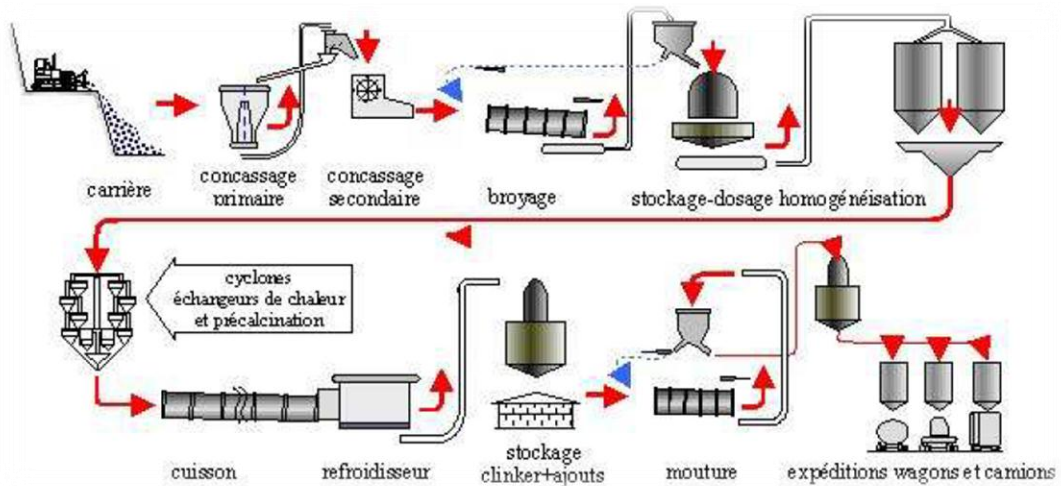


Figure I.2. Fabrication de ciment [4]

I.1.5. Préparation de la matière première

Les grains de calcaire et d'argile sont intimement mélangés par broyage, dans des proportions définies, en un mélange très fin, le « cru ». À ce niveau, des corrections de composition peuvent être effectuées en incorporant, en faible proportion, de la bauxite, de l'oxyde de fer, etc. Le mélange cru est préparé automatiquement en fonction de la technique de fabrication utilisée.

Les matières premières sont les matières utilisées en plus grand pourcentage. Elles contribuent, essentiellement, avec les oxydes principaux Ca O, SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃. Les principales matières premières nécessaires à la fabrication du ciment sont extraites du calcaire et de l'argile. En effet le calcaire fournit le carbonate de calcium plus de 80% de CaCO₃ et l'argile fournit la silice moins de 40% de CaCO₃ et les oxydes d'aluminium et de fer.

I.1.6. Préparation du cru

Les morceaux de calcaires et d'argile sont broyés très finement et sont intimement mélangés pour donner le cru. Deux techniques de fabrication sont utilisées : le mélange est préparé sous forme de poudre (c'est la voie sèche ou semi sèche) ou sous forme de pâte (c'est la vois semi humide ou humide).

La voie sèche est aujourd'hui la plus utilisée. la pratique du pré homogénéisation affine considérablement le dosage du calcaire et de l'argile, par l'empilement de nombreuses couches des deux matières premières.

Au sortir de pré homogénéisation, le mélange est broyé très finement pour donner ce cru dont nous venons de parler. Le cru est ensuite ré homogénéisé par fluidisation [5].

I.1.7 Composition du cru

La composition du cru respecte généralement les proportions dans le tableau (1) suivantes :

Tableau I.1 : Composition du cru [6]

Composant du cru	proportion
Carbonate de calcium (CaCO ₃)	77 à 83 %
Silice (SiO ₂)	13 à 14%
Alumine (Al ₂ O ₃)	2 à 4%
Alumine (Al ₂ O ₃)	1,5 à 3%

I.1.8. Broyage du ciment

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. Dans certains cas, en plus du gypse, on ajoute d'autres constituants tels que le laitier de haut-fourneau, les pouzzolanes, les cendres volantes ou les fillers pour l'obtention de diverses catégories de ciment

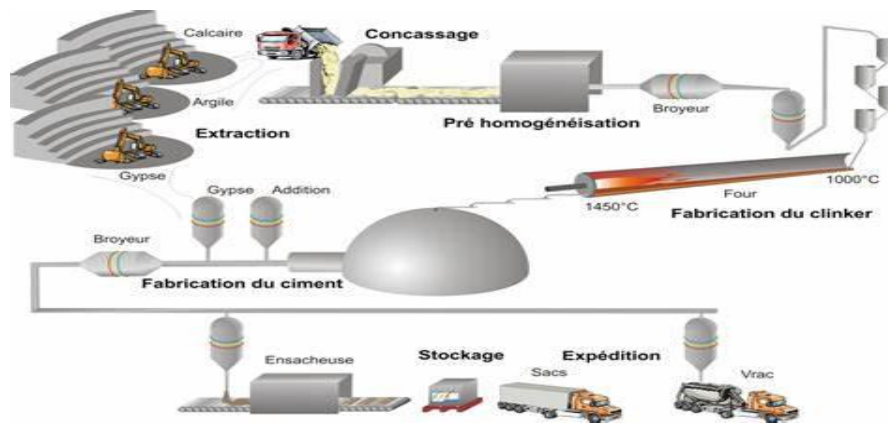
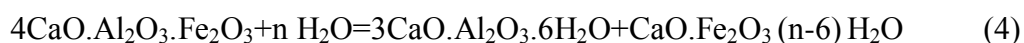
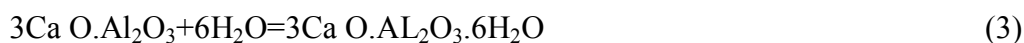
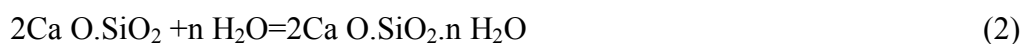


Figure I 03 : procédé de traitement et de valorisation [7]

I.1.9. durcissement du ciment portland et formation de sa structure

Une action réciproque physique et chimique complexe se produit lorsqu'on mélange le ciment à l'eau. Les minéraux de clinkers fondent d'abord depuis la surface des grains jusqu'à la formation d'une solution saturée. Ensuite, par la combinaison de l'eau à la phase solide du liant, surgissent des combinaisons hydratées de haute dispersion colloïdale, sans dissolution intermédiaire de la matière d'origine. Simultanément à lieu la prise de la masse. Durant la période finale il se produit une recristallisation des particules des nouvelles formations colloïdales en des particules de plus grandes dimensions, ce qui entraîne le durcissement du système et l'augmentation de sa résistance [8].

L'action réciproque des minéraux du clinker avec l'eau se déroule conventionnellement d'après les réactions suivantes :



La vitesse d'hydratation des minéraux de clinkers détermine aussi la vitesse de leur durcissement. Plus la vitesse d'hydratation d'un minéral est grande, plus l'accroissement de sa résistance est rapide. C'est ainsi que les caractéristiques de la vitesse d'hydratation des minéraux de clinkers peuvent servir à l'étude de la composition minéralogique du clinker à

ciment portland, qui doit satisfaire à des exigences spéciales concernant la vitesse de durcissement.

Le progrès du processus de compactage de la pâte de ciment détermine la formation de macles cristallines qui densifient de plus en plus la pierre de ciment au cours de durcissement. Tel est, dans les grandes lignes, le schéma de transformation d'une poudre clinker, qui est la partie principale d'un ciment portland, en une pierre artificielle solide.

La présence dans le ciment portland, à côté du clinker, du gypse et des adjuvants hydrauliques change sensiblement le processus de durcissement de la pâte de ciment ainsi que la composition du produit final, la pierre de ciment. [8]

I.1.10. La calcination

Généralement réalisée dans un four rotatif à haut température, généralement entre 1400°C et 1500°C pendant son séjour dans le four. Cela permet de décomposer les matières premières, telles que le calcaire et l'argile, en clinker, qui est ensuite broyé pour obtenir le ciment fini. La réaction chimique pendant la calcination libère du d'oxyde de carbone et forme de nouvelles phases cristallines qui confèrent les propriétés désirées au ciment.

En effet, sous l'effet de la chaleur, les constituants d'argile ou d'autres matériaux (silicates d'alumine et d'oxyde de fer) se combinent avec la chaux provenant du calcaire pour donner lieu aux silicates et aluminates de chaux [9]. Le cycle du traitement comportant les phases suivantes :

- Le préchauffage qui s'effectue dans un échangeur de chaleur situé à l'amont du four.
- Le gaz chaud provenant du four y brassant la farine à contre-courant.
- La décomposition des argiles s'effectue au-dessus d 500°C.
- La décarbonatation des calcaires s'effectue à 950°C dans la partie médiane du four dont les températures sont comprises entre 550 et 1000°C.
- La formation du clinker ou clinkérisation se produit à 1450°C, et s'effectue en partie avale du four près du brûleur.

I.1.11. Les différents ciments

Les ciments peuvent être classés en cinq grandes familles et 27 variantes principales (voir la norme en (EN-197-1-2000) pour plus de détails :

- Ciment Portland (noté CEM I)

- Ciment portland composé (noté CEM II)
- Ciments de hauts fourneaux (noté CEM III)
- Ciments pouzzolaniques (noté CEM IV)
- Ciment en laitier et aux cendres ou ciment composé (noté CEM V)
- La désignation des ciments est normalisée

I.1.12. Type de ciment

Nous allons identifier les Cinq types de ciment portland connus et décrire les caractéristiques chimiques et physiques de chacun d'entre eux.

Type 1 : c'est du ciment normal. Il est obtenu en mélangeant du gypse avec du clinker. Il est utilisé dans de nombreuses constructions industrielles et civiles (chaussées, structures, maisons, etc.). Il est utilisé dans la plus part, des projets, à moins que les spécifications de construction n'indiquent le contraire.

En faveur de ce type de ciment : sa résistance initiale et un temps de décapage plus court.

Type 2 : il s'agit d'un ciment modifié, très utile dans les constructions qui nécessitent une grande quantité de béton (par exemple un barrage) ou qui offrent une résistance aux attaques des sulfates ou des chlorures (ouvrages en contact avec l'eau, là encore l'exemple du barrage est utile).

Cependant, ce ciment peut également être trouvé dans les ponts ou les tuyaux en béton.

Le type II de portland atteint sa résistance plus lentement que le type I, bien qu'il finisse par l'égaliser. Parmi ses principales caractéristiques, nous pouvons souligner sa résistance à la dégradation et à la corrosion, de sorte que nous n'avons pas à nous soucier de donner à la construction un entretien constant et exhaustif pour prolonger sa vie utile.

Type 3 : il offre une résistance initiale élevée, mais augmente au fil des jours. En d'autres termes, il faut 7 jours pour atteindre la résistance du type I et 28 jours pour le type II.

Il est utilisé pour les constructions d'urgence ou les éléments préfabriqués. Nous pouvons dire qu'il est fortement recommandé dans les cas où il y a besoin d'une résistance accélérée.

Il est très similaire au ciment portland de type I, sauf que les particules sont beaucoup plus fines.

Type 4 : C'est un ciment à faible chaleur d'hydratation, il est donc utilisé dans les travaux qui ne nécessitent pas une grande résistance initiale.

Il est utilisé dans les grands ouvrages en béton, tels que les tunnels ou les barrages. Il atteint sa force optimale après 30 jours. Cependant, la procédure se poursuit lentement, elle ne s'arrête pas.

Type 5 : C'est un ciment utilisé dans la construction d'ouvrages d'éléments qui nécessitent une forte résistance aux attaques des alcalins et des sulfates (tuyaux, dalle, égouts, infrastructures portuaires...).

Pour y parvenir, il faut réduire la quantité d'aluminate tricalcique, le composant le plus vulnérable aux sulfates [10].

I.1.13. Propriétés principales

Le ciment portland contient 4 principaux constituants :

- Le silicate bicalcique (Bélite) : $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$ ou par abréviation C_2S .
- Le silicate tricalcique (Alite) : $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$ ou par abréviation C_3S .
- L'aluminate tricalcique (Célite) : $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$ ou par abréviation C_3A .
- L'alumino-ferrite tetracalcique (Célite) : $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$ ou par abréviation C_4AF .

I.1.14. Utilisation du ciment portland

Il est utilisé pour les constructions d'urgence ou les éléments préfabriqués. Nous pouvons dire qu'il est fortement recommandé dans les cas où il y a besoin d'une résistance accélérés. « Il est très similaire au ciment portland de type I, sauf que les particules sont beaucoup plus fines »

Tableau I.2 : Les cinq types de ciments courants et leur composition (NF P 15-301) [11]

Notation du type de ciment	Désignation	Clinker (K) (%en poids)	Composants principaux (%en poids)	Nature	Composants secondaires (%en poids)
CEM I	Ciment portland	95-100	0	-	0-5
CEM II/A	Ciment portland composé	80-94	6-20	Calcaire (L) Laitier granulé (S) Fumée de silice (D, max.10%) Pouzzolanes	0-5
CEM II/B		65-79	21-35		

				(P, Q) Cendre volantes (V, W) Ou schiste carbonisé(T)	
CEM III/A	Ciment de haut fourneau	35-64	36-65	Laitier granulé	0-5
CEM III/B		20-34	66-80		
CEM III/C		5-19	81-95		
CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65-90	10-35	Pouzzolanes, cendre volantes	0-5
CEM IV/B		45-64	36-55		
CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40-64	18-30	Laitier granulé et pouzzolanes et /ou cendre volantes	0-5
CEM V/B		20-39	31-50		

I.1.15. Les constituants du ciment

I.1.15.1. Le clinker

Est un constituant du ciment, qui résulte de la cuisson à très haute température d'un mélange composé d'environ 80% de calcaire (CaCO₃ qui apporte l'oxyde de calcium, Ca O) et de 20% d'aluminosilicates (essentiellement des argiles : phyllo silicates) qui apportent les oxydes de silicium(SiO₂), d'aluminium (Al₂O₃) et de fer (Fe O et Fe₂O₃).la « farine » ou le « cru » est formé du mélange de poudre de calcaire et d'argile.la cuisson, ou clinkérisation.

La consommation calorifique est comprise entre 3000 et 8000 méga joule/tonne de clinker.

On en déduit que pour produire une 1 tonne de clinker, il faut bruler entre :

- 90 à 240 kg de charbon.
- 79 à 210 kg de gaz naturel.
- 70 à 186 kg de diesel.

Tableau I.3 : composition chimique du clinker [12]

Composants du clinker	Ca O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Notation cimentière	C	A	F	S	M	S	K	N
Teneur limites (%)	62-67	2-9	1-5	19-25	0-3	1-3	0,6	0,6

I.1.15.2 .Broyage du clinker

À la fin de la cuisson, la matière brusquement refroidie se présente sous forme de granules noires de 1 à 3 cm de diamètre qui constituent le clinker, « principe actif » du ciment. Celui-ci, finement broyé avec du gypse (moins de 5%) pour régulariser la prise, donne le ciment portland. Les autres types de ciment sont obtenus en ajoutant d'autres constituants tels que du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, des schistes calcinés, du calcaire, des fumées de silice. Qui sont des matériaux pouzzolaniques [13].

Il s'agit du clinker dont la composition est la suivante :

Tableau I.4 : Composition minéralogique de clinker [14]

Nom cimentier	Formule	Min	Max
Alite (silicate tricalcique)	Ca_3SiO_5	45.0%	79.7%
Bélite (silicate bi calcique)	Ca_3SiO_4	5.7%	29.8%
Aluminate tricalcique	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	1.1%	14.9%
Aluminoferrite Tétra-calcique	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	2.0%	16.5%
Chaux libre	Ca O	0.6%	2.8%

I.1.15.3. Le gypse CaSO_4

Le gypse est la matière première d'ajout utilisée pour la fabrication du ciment. Cette roche minérale s'est formée il Ya 40 million d'années grâce à l'évaporation de l'eau de mer, composé de sulfates de calcium di hydraté « $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ». Le gypse est constitué en couches épaisses et se trouve aujourd'hui enterrée sous terre. Ces couches de gypse sont séparées entre elles par d'autres masses rocheuses. C'est un retardateur de prise.

I.1.16. Hydratation du ciment

La pâte de ciment hydraté est le résultat de réactions chimiques entre l'eau et les composées du ciment. Il s'agit d'un processus complexe dans lequel les principaux composés du ciment C_3S , C_2S , C_3A , et C_4AF réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent la prise et le durcissement progressif du matériau. L'hydratation du ciment portland implique, nous venons de le voir la réaction des quatre phases minérales qui le composent. Comme le ciment est composé principalement de C_3S , est l'hydratation du C_3S qui contrôle la cinétique globale d'hydratation. il existe cependant une synergie entre les différentes réactions [15].

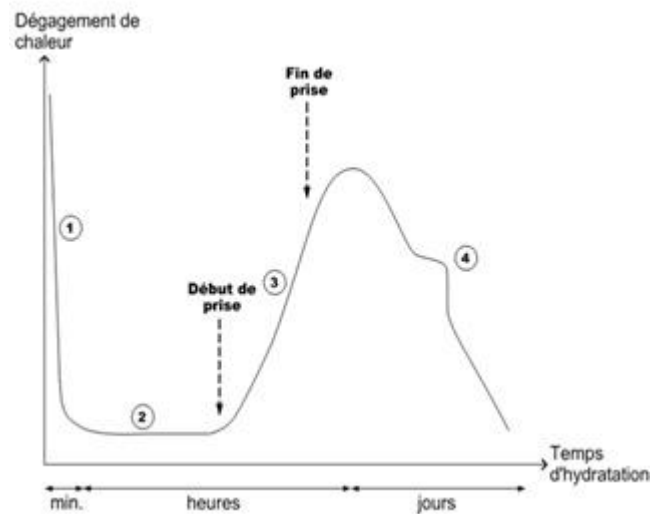


Figure I.3 : présente les courbes de chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment portland [15]

I.1.16.1. Période 1 : réaction initiales

Cette période débute dès le contact entre l'eau et le ciment et dure quelques minutes. Le C_3S et le C_3A des grains de ciment réagissent immédiatement avec l'eau, formant de l'étrangéité et des C-S-H (métastables). Cela correspond donc à une phase de dissolution. Les ions entrent en solution.

I.1.16.2. Période 2 : période dormante

Le dégagement de chaleur est faible. Aucune évolution de la pâte ne semble de produire. Les réactions chimiques ont pourtant commencé : des ions passent en solution dans l'eau durant cette phase (ions calcium, silicates, hydroxydes et sulfates). Quand l'eau de gâchage est saturée en ions, le début de prise se produit. Le pH la solution augmente, ce qui ralentit la dissolution des constituants.

I.1.16.3. Période 3 : période d'accélération

Cette période débute lorsque la concentration en ions Ca^{2+} et OH^- de la solution devient critique, la conductivité électrique de la solution étant alors à son maximum. Cette sursaturation induit la précipitation de la portland-ite. Il s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (ettringite, portland-ite, C-S-H). Cette activité chimique dégage beaucoup de chaleur. Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer et créent donc un solide.

I.1.16.4. Période 4 : période de ralentissement

Les grains anhydres se trouvent recouverts d'une couche d'hydrates qui s'épaissit de plus en plus. Pour que l'hydratation se poursuive, il faut que l'eau diffuse à travers les pores de gel. La chaleur dégagée diminue.

Si le réseau poreux est fermé, une partie du ciment n'est jamais atteinte et donc ne sera jamais hydratée. C'est pendant cette période que l'étrangéité de type AFt se dissout afin de se transformer en type AFm.

Les mécanismes complexes à l'origine de la création des différents produits de l'hydratation que sont les silicates et les aluminates sont l'adsorption, l'hydrolyse, la dissolution, la solvataion et la cristallisation. [16]

I.1.17. Propriété technique du ciment portland

Le mortier à base de ciment portland est utilisé dans le domaine de la construction en raison de ses propriétés mécaniques. Le ciment se caractérise par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle, soit sur la poudre, soit sur la pâte, soit sur le « mortier normal » [17].

- La surface spécifique
- Résistance à la compression
- Résistance à la flexion
- Résistance à la traction
- La résistance mécanique
- La consistance normale
- La prise du ciment
- L'uniformité de la variation volumique
- La chaleur d'hydratation
- Le retrait et le gonflement.

I.1.18. Emploi habituels

✓ Il est utilisé comme ciment de base pour les travaux de génie civil en milieu agressif

✓ Il est utilisé dans les travaux de béton nécessitant une faible chaleur d'hydratation. [18]

I.2. IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT (EMISSIONS DE CO₂) :

Le ciment portland est produit en très grandes quantités dans le monde, à des coûts très faibles, mais il est en contrepartie de grandes quantités de CO₂. Il est possible d'ajouter des additifs au clinker par l'intermédiaire des ciments mélangés pour réduire les émissions de CO₂ liées à la production de ciment. Pour cela, il est nécessaire de les remplacer par des matériaux qui n'induisent pas ou peu d'émissions de CO₂ mais permettent de fabriquer des liants structurels solides [19].

I.2.1. Les niveaux d'émissions de CO₂ de l'industrie cimentière

La production de ciment résulte de la chauffe à des températures extrêmement élevées (environ 1450°C) d'un mélange de roches calcaires et argileuses, appelé cru. Ce procédé requiert une quantité significative d'énergie, généralement obtenue par la combustion de divers combustibles fossiles tels que le charbon, le gaz naturel ou le fioul, entraînant ainsi des émissions considérables de CO₂.

Selon une enquête réalisée par le WBCSD, l'industrie du ciment représente 5 % des émissions de gaz à effet de serre associées à l'activité humaine. Pour l'industrie du ciment, ces émissions se divisent principalement en deux catégories : les émissions liées à l'énergie et les émissions de procédé. Les émissions énergétiques découlent de la production de l'énergie thermique requise pour fabriquer le clinker. Les émissions de procédé résultent du fait que le CO₂ est produit dans le cadre de la réaction chimique transformant le carbonate de calcium en clinker, connue sous le nom de décarbonatation du carbonate de calcium [19].

En plus de ces deux principales sources, il est nécessaire de prendre en compte les émissions engendrées par le transport des matières premières et la consommation d'électricité. Selon une étude de juin 2009 publiée par le WBCSD, la moyenne mondiale des émissions de CO₂ par tonne de clinker produite était de 866 kg en 2006.

Selon un précédent rapport de la WBCSD datant de 2002, la ventilation des émissions de CO₂ lors de la production de clinker est présentée dans (la figure I.4) ci-jointe.

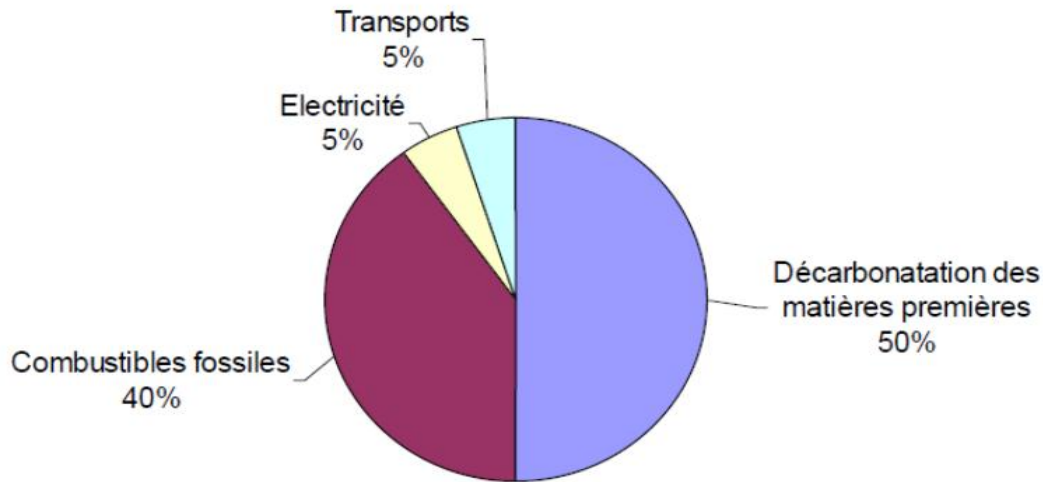


Figure I.4 : Répartition des émissions de CO₂ selon leurs sources dans L'industrie cimentière [19]

Le CO₂ émis peut être séparé en deux parts principales en fonction de sa source :

- Le dioxyde de carbone provenant de la combustion des énergies fossiles utilisées dans le four
- Le dioxyde de carbone résultant de la décarbonation de la matière première Haut du formulaire

En réalité, il faut y ajouter le CO₂ émis par les moyens de transport et la production de l'électricité nécessaires pour le fonctionnement de la cimenterie [19].

I.2.2. Solutions pour réduire les émissions de CO₂ :

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

- Avant cuisson, incorporation dans les matières premières certains matériaux sélectionnés (cendres volantes), qui sont soit déjà décarbonatés soit ne contenant pas de calcaire.
- Après cuisson, incorporation dans les ciments des constituants (laitiers de haut-fourneaux ou cendres volantes) réduisant d'autant la quantité de clinker qui est la matière issue de la cuisson et constituant de base du ciment.
- Utilisation des combustibles de substitution comme certains déchets. S'ils n'étaient pas brûlés en cimenterie, ces déchets seraient éliminés par la voie de l'incinération traditionnelle. Dans ce cas, les rendements énergétiques sont beaucoup plus faibles et quelquefois nuls. Les émissions de CO₂ correspondantes viennent alors s'ajouter à celles

dues à la fabrication des ciments, et des déchets ultimes sont placés en décharge sans aucune valorisation en produisant parfois même du méthane, autre gaz à effet de serre.

- En définitive, toute utilisation de déchet comme combustible pour la fabrication des ciments est une « valorisation », souvent préférable d'un point de vue écologique à l'élimination car elle permet des économies d'énergie et la diminution des émissions de CO₂ [20].

I.3. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons parlé en générale sur le ciment portland, connaître les différentes additions minérales sur le ciment. On a présenté d'une façon succincte le matériau « ciment », sa composition minéralogique, le mécanisme de l'hydratation et le produit issu de ce phénomène.

Il s'agit pratiquement d'un élément parmi d'autres dans tout ouvrage en béton, c'est pourquoi vous le connaît peut-être mieux sous le nom de « ciment gris » et il est présent dans de nombreux éléments d'architecture publique. C'est pourquoi nous avons voulu expliquer dans cet article d'où vient le concept de « Portland »

Il offre des qualités spectaculaires (adhésif, durable, isolant, hydraulique, etc.), qui le rendent idéal pour les grands projets (ponts, barrages, etc.).

Son processus de fabrication, bien qu'entièrement automatisé, nécessite des étapes très distinctes qui requièrent des températures, des diamètres et des matériaux spécifiques pour obtenir un produit parfait.

CHAPITRE II :
LES ADDITIONS MINERALES

CHAITRE II : LES ADDITIONS MINÉRALES

II.1. INTRODUCTION

Plusieurs ajouts minéraux sont aujourd'hui employés dans le béton. On les utilise en addition ou en remplacement d'une partie du ciment en tant que matières cimentaires supplémentaires.

Grâce à leur utilisation, le béton obtient une structure plus solide qui sera plus résistante aux substances agressives telles que les sulfates, les chlorures et d'autres produits agressives. Les propriétés cimentaires du béton sont influencées par la finesse des ajouts minéraux, leur composition chimique, leur structure (vitreuse ou cristalline) et leur solubilité en milieu alcalin. La réactivité des ajouts minéraux est influencée par leur contenu en phase amorphe.

Il a été démontré que l'introduction des ajouts minéraux dans la pâte de ciment entraîne à la segmentation des larges pores capillaires et offrent un grand nombre de sites de germination pour la précipitation des produits d'hydratation qui accélèrent l'hydratation du ciment et permet de réduire les dimensions des cristaux de chaux.

II.2. ADDITIONS MENIRALES

II.2.1. Définition

Une addition minérale est une poudre d'une finesse supérieure à celle du ciment. Elle peut être ajoutée et/ou substituée au ciment lors de sa fabrication (ciment composé) ou ajoutée directement dans le malaxeur lors de la fabrication du béton. Elle permet ainsi d'améliorer certaines propriétés ou conférer aux matériaux des propriétés particulières. On distingue deux types d'additions : les additions inertes et les additions réactives. L'AFGC recommande l'emploi d quantités importantes de fines dans un BAP pour assurer sa stabilité à l'état frais et éliminer les risques d ségrégation. Quand ce volume est occupé intégralement par du ciment portland, il fournit au matériau durci, un niveau de performance excessif par rapport aux spécifications demandées. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que le dégagement de chaleur engendré par les réactions exothermiques produites lors de l'hydratation du ciment peut provoquer des additions minérales, qui sont moins réactives que le clinker et d'un cout inférieur sur le plan énergétique et environnemental ce qui réduit largement le prix final du BAP. Ainsi, l'utilisation des additions minérales est intéressante car la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granulométries différentes permet d'améliorer la granulométrie totale des particules fines ainsi que celle du mélange de

béton. Ceci favorise l’augmentation de la stabilité et l’accroissement de déformabilité du béton. [21]

II.2.2. Utilisation des additions minérales en Algérie

Alors que l’emploi des additions minérales se soit généralisé dans le monde, il reste très limité en Algérie. L’emploi de ces matériaux n’est pas encore répandue dans le domaine du génie civil malgré la disponibilité en grande quantité de ces ajouts tels que le laitier granulé, le calcaire ou la pouzzolane naturelle et leur couts relativement réduit par rapport au ciment. En effet de nombreuses études ont été réalisées traitant de l’influence des additions minérales sur plusieurs aspects des bétons.

Actuellement, l’emploi des adition se limite seulement au secteur l’industrie cimentaire pour la production du ciment composé. [21]

Tableau II.1 : L’utilisation des différentes additions dans les cimenteries algériennes [22]

Entreprise	Cimenterie	Ajout utilisé
ERCE	Ain touta (Batna)	Pouzzolane
	Ain el kebira (setif)	
	Hammam bouziane (Constantine)	
	H’djar es aoud (Skikda)	Laitier
	Tébessa	
ERCC	Meftah	Tuf / calcaire
	Raiss hamidou	Poussière
	Sour el ghozlane (Bouira)	Calcaire /tuf
ECDE	Chlef	Calcaire
ERCO	Bani saf (Tlemcen)	Pouzzolane
	Zahana (Oran)	
	Saida	

II.2.3 Type aditions minérales

Les ajouts minéraux se substituant au ciment peuvent être classés en fines actives telles que la fumée de silice et la pouzzolane naturelle et en fines inertes telles que le calcaire. Par ailleurs, le cadre normatif français propose six matériaux minéraux répondant à la définition « additions pour béton hydraulique» à savoir : [23]

II.2.3.1 Additions de type I selon la norme EN 206-1

- Les additions calcaires (NF P 18-308),

- Les additions siliceuses (NF P 18-509),
- Les fillers (NF P 18-501)
- Quasiment – inertes (NF P18-325)

II.2.3.2 Additions de type II selon la norme EN 206-1

- Les fumées de silice (NF P 78-502),
- Les cendres volantes de houille (NF P 18-505),
- Le laitier vérifié moulu de haut fourneau (NF P 18-506),
- La pouzzolane naturelle (EN 197-1)

II.2.4 Action des additions minérales sur les matériaux cimentaires

De nombreux mécanismes d'action des additifs minéraux entraînent des changements dans la rhéologie de la pâte de ciment ou de béton. Les ajouts minéraux ont des effets chimiques et physiques sur le béton qui en altèrent les caractéristiques à l'état brut ou durci :

- amélioration de l'ouvrabilité, de la rhéologie et de l'homogénéité du béton à l'état frais
- L'efficacité de la liante hydraulique diminue et la fissuration est améliorée.
- La résistance du béton aux agressions chimiques a été améliorée.
- meilleure apparence des revêtements.

II.2.4.1. Actions physiques

L'effet filler peut améliorer la compacité du mélange en réduisant la porosité des particules fines d'addition et en améliorant la finesse de l'addition, tout en favorisant l'hydratation du ciment.

II.2.4.2. Action chimiques

Certaines additions ont une activité hydraulique latente ou une activité pouzzolanique. Ces actions, fonction de la réactivité de chaque addition permettent d'améliorer les propriétés des bétons à l'état durci et leur durabilité. [24]

Cette étude a fait appel à deux additions minérales, la perlite et la pouzzolane.

II.2.5. Additions pouzzolaniques dans les cimenteries algériens

L'Algérie possède une importante réserve de matériaux pouzzolaniques d'origine volcanique, principalement utilisés dans certaines cimenteries malgré les études universitaires réalisées

sur le sujet. Ces matériaux sont localisés dans l'ouest du pays sur une distance de 160 km. L'industrie cimentière algérienne produit principalement un type de ciment à faible teneur en ajout. Pour augmenter la production et réduire les coûts, l'utilisation d'ajouts peu coûteux est préconisée, mais actuellement limitée à de faibles proportions. Certaines cimenteries utilisent déjà des matériaux comme le laitier de hauts fourneaux d'El-Hadjar et la pouzzolane naturelle de Beni-Saf. La nouvelle cimenterie de M'sila a développé un ciment CEM II à base de pouzzolane et de calcaire. Plusieurs études ont été menées sur l'impact des additifs cimentaires en Algérie, démontrant l'amélioration des caractéristiques mécaniques des mortiers et bétons. L'utilisation de la pouzzolane de Béni-Saf a été particulièrement vantée pour ses avantages économiques et écologiques. [25]

Tableau II.2 : ajouts et types des ciments produits dans les cimenteries algériennes [26]

Groupe	Cimenterie	Ajouts utilisés	Type de ciment
ERCE	Ain touta	Pouzzolane	CPJ-CEM II/A 42,5
	Ain El kebira		CPJ-CEM II/A 42,5
	Hamma bouziane		CPJ-CEM II/A 42,5
	Hdjar Essaoud	Laitier	CPJ-CEM II/A 42,5
	Tebessa	Calcaire pur	CPJ-CEM II/A 42,5
ERCC	Meftah	Tuf/calcaire	CPJ-CEM II/A 32,5
	Raiss hamidou	Poussière	CPJ-CEM II/A 32,5
	Sour El ghozlane	Calcaire /tuf	CPJ-CEM II/A 42,5
ECDE	Chelef	Calcaire	CPJ-CEM II/A 42,5 CPJ-CEM II/A 52,5 CPJ-CEM II/A 32,5
ERCO	Béni-saf	Pouzzolane	CPJ-CEM II/A 42,5
	Zahana		CPJ-CEM II/A 42,5
	saida		CPJ-CEM II/A 42,5

II.2.6. Classification des additions minérales

Ces matériaux *sont issus* des sous-produits de *la métallurgie*, des centrales thermiques à charbon *naturel* et sont *classés* NF EN 197 1 en ajouts minéraux inertes et actifs.

Ils se décomposent en fonction de leur réactivité comme le montre le tableau II.3.

Tableau II.3 : Classification des ajouts selon leur réactivité [27]

Type	Réactivité	Matériau
Hydraulique	Fortement réactif	Ciment spéciaux chaux hydraulique
Hydraulique latent		Laitier granulé cendres volantes riche en calcium (calcique)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, terres a diatomées
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire,...) fibres, pigments colorants matières expansives, dispersions synthétique

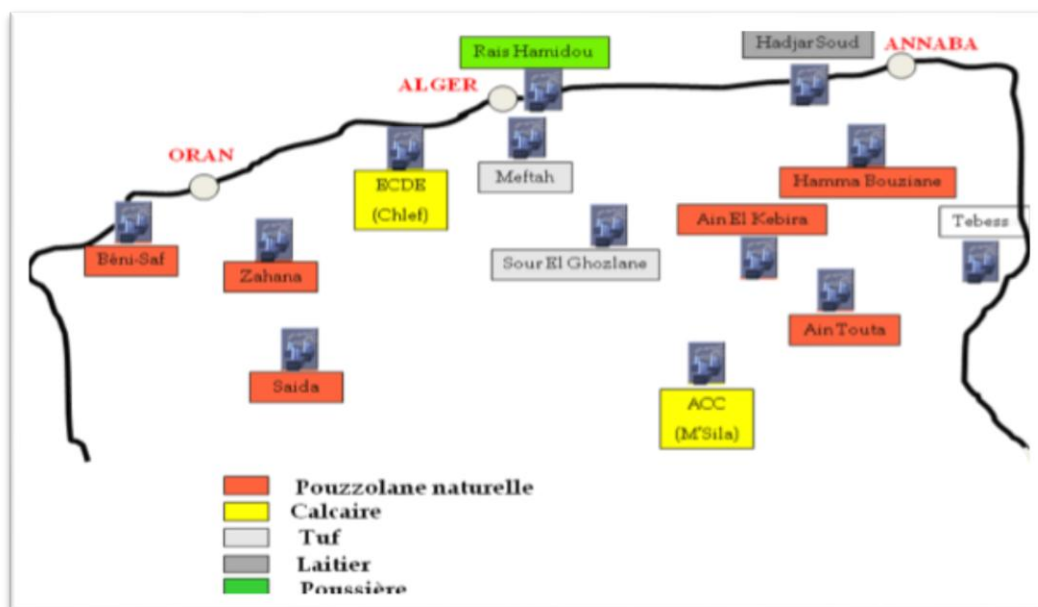


Figure II.1 : répartition de l'utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [28]

II.3. LA PERLITE

En tant que sable ou de granules de couleur blanche, la perlite est une roche volcanique siliceuse concassée et calibrée (Figure II.2). Elle est très stable dans le temps en raison d'un refroidissement rapide et se dilate de quatre à vingt fois son volume d'origine sous l'effet de l'évaporation de l'eau. La porosité de la pierre volcanique entraîne la formation d'innombrables petites bulles d'air. Cette porosité confère à la perlite des propriétés physiques remarquables, telles qu'une faible conductivité thermique et une légèreté incroyable pour la perlite expansée.

De la famille des rhyolites perlitiques, à teneur eau assez élevée (2 à 6% d'eau combinée chimiquement), généralement constituée par l'hydratation d'obsidienne. Elle présente l'habitude de s'expansé à une température comprise entre 850°C et 1100°C. Cette croissance se manifeste par un volume qui passe de 7 à 20 fois le volume de départ.

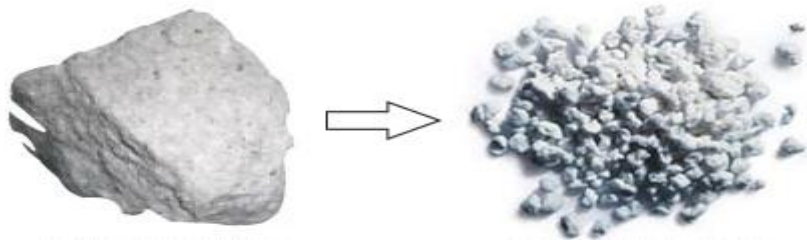


Figure II.2 : Usages recommandés de la perlite [29]

I.3.1. Réserves de perlite en Algérie

La perlite existe dans les roches volcaniques et sédimentaires au Nord-Ouest de Tlemcen près de Hammam BOUGHRARA pré (MAGHNIA). Les gisements sont localisés près des routes et peuvent apparemment être exploités à ciel ouvert [30]

La roche (Figure II.3.a) est d'abord concassée et calibrée par granulométrie (Figure II.3.b). L'expansion industrielle de la perlite est réalisée par EFISOL dans des fours spéciaux, fixes ou rotatifs. Sous l'effet de la chaleur, les grains de perlite s'expansés : une multitude de cellules fermées se constituent à l'intérieur des grains. La perlite est utilisée sous forme d'une poudre tamisée à 80 µm dans tous les essais (Figure II.3.c). La composition chimique de la perlite broyée est montrée dans le tableau II.4.



Figure II.3 : Perlite naturelle (a), concassée (b), broyée (c) [31]

Tableau II.4 : Composition chimique élémentaire de la perlite de Hammam Boughrara [32]

CaO	SiO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Cl	CaCO ₃
3.16	76.40	13.43	2.92	0.01	4.33	0.82	0.37	0.008	8.75

La perlite de Maghnia est des roches intrusives, légères, massives, dures, formées dans les zones de fin de contact des massifs intrusifs acides de Rhyolite (Liparite) suite au refroidissement rapide et la cristallisation en subsurface [33]. Deux sites situés au Nord-est de Maghnia sont reconnus comme gisement de la perlite (Tableau II.5). Ils forment des petits corps lenticulaires d'épaisseur 6 à 29 m et une longueur de 150 à 300 m.

Tableau II.5 : les principaux gisements de la perlite de Maghnia. [34]

N° de gisement	Réserves ou paramètres estimatifs en tonnes	Conditions techniques et minières	Composition chimique (%) ou propriété physico-mécaniques
93	Secteur principale : 142500 Secteur Bab : 196000 Secteur Roussel : 15000	Favorable (Inexistence de roche de recouvrement)	SiO ₂ = 71.68 AL ₂ O ₃ =12.69 Fe ₂ o ₃ = 1.34 CaO=1.08 Mg O =0.55 K ₂ O= 3.91 Na ₂ O = 3.62 Fe O = 0.49 SO ₃ =0.08 P ₂ O ₅ = 0.05 PF = 3.53 (perte aux feux %)
94	Considérables	Favorable	SiO ₂ = 71.38 AL ₂ O ₃ =14.25 Fe ₂ o ₃ = 2.19 CaO=0.7 Mg O =0.35 K ₂ O= 3.30 Na ₂ O = 4.00 Fe O = 1.15

II.3.2. Gisement de la perlite Hammam Boughrara

La perlite a été extraite du gisement de hammam Boughrara à Tlemcen, en Algérie. On peut observer cette forme de roches volcanique siliceuses. La figure II.4.

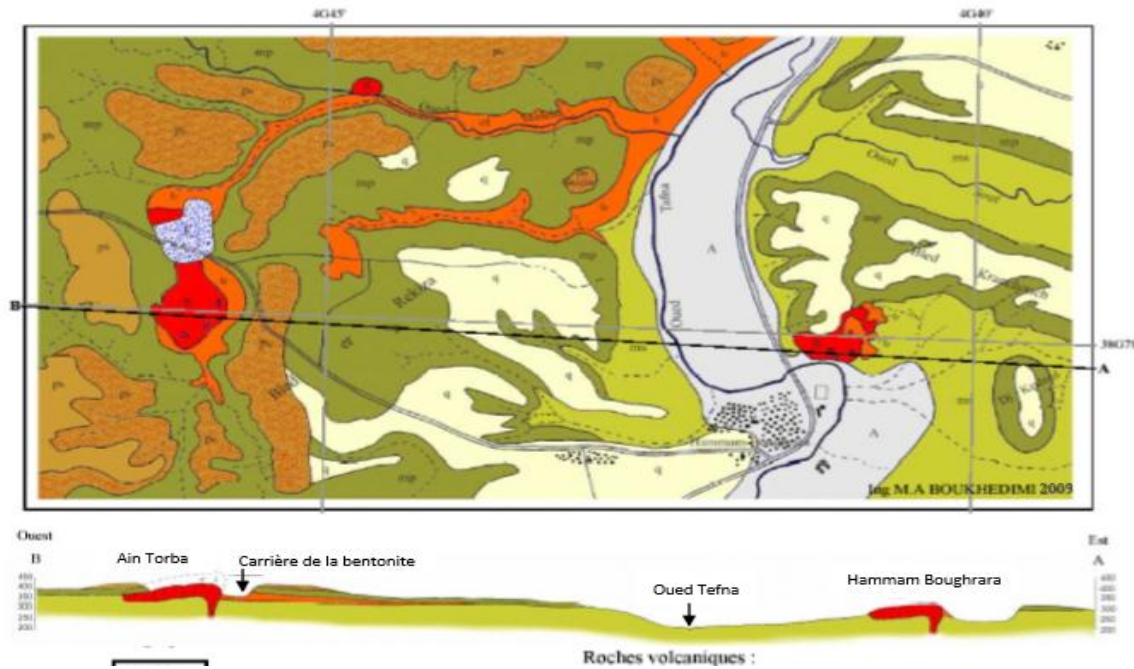


Figure II.4 : localisation du gisement de Hammam Boughrara [35]

II.3.2 Rôle de la perlite

Perlite a joué un rôle dans l'industrie de la construction en tant que matériau isolant pour les murs et les toitures. Il est également utilisé dans la fabrication d'agréats légers pour le béton, ce qui permet de réduire le poids structurel et d'améliorer les propriétés thermiques.

II.3.3 Propriétés physique et chimiques de la perlite

La perlite est un minéral volcanique unique doté de propriétés physiques et chimiques distinctes applications industrielles et horticoles. Voici les principales propriétés physiques et chimiques de la perlite : [36]

II.3.3.1 propriété physique

1. **légèreté** : la perlite est exceptionnellement légère en raison de sa structure expansée en forme de bulle. sa faible densité apparente le rend facile à manipuler et à transporter.
2. **Structure poreuse** : la structure de la perlite est constituée d'innombrables vides ou bulles microscopiques remplis d'air. Cette porosité contribue à son excellente capacité d'isolation et de rétention d'eau.
3. **Couleur** : la perlite est généralement blanche ou grise, bien que sa couleur puisse varier légèrement selon sa source.

4. **La taille des particules** : la perlite est disponible en différentes tailles ou qualités de particules, allant de fine à grossière. Le choix de qualité dépend de l'application spécifique.
5. **Propriétés isolantes** : la perlite est un matériau isolant efficace en raison de sa faible conductivité thermique. Il est utilisé dans la construction et dans les applications industrielles pour améliorer l'isolation.
6. **Faible densité** : la perlite a une faible densité, ce qui la rend adaptée à la production de béton léger et de granulats.
7. **L'absorbance** : la perlite a la capacité d'absorber et de retenir l'eau, ce qui la rend utile en horticulture pour maintenir l'humidité et l'aération du sol.
8. **Neutralité du Ph** : la perlite a un Ph neutre, ce qui signifie qu'elle ne modifie pas de manière significative le ph du milieu dans lequel elle est utilisée, ce qui la rend adaptée à une large gamme d'applications.

Les plus importantes propriétés physiques de la perlite sont énumérées dans le tableau II.6.

Tableau II.6. Propriétés physiques de la perlite brute [37]

Désignation	Propriété
Couleur	Grise, brune, noire, verte
Masse volumique absolue	2,3 à 2,8 g/cm ³
Masse volumique apparente	1,2 à 2,35 g/cm ³
Dureté	5,5 à 7 (échelle de Mohs)
Point de fusion	760 à 1320 °C
Température d'expansion	600 à 1100 °C
Rapport d'expansion	10 à 20 (volume)

II.3.3.2 propriétés chimique

1. **Composition** : la perlite est principalement composée de dioxyde de silicium amorphe (SiO₂) et de petites quantités d'eau. Sa formule chimique peut être exprimée par (SiO₂)³. (H₂O).
2. **Stabilité** : la perlite est chimiquement stable et ne réagit pas facilement avec d'autres substances, ce qui est avantageux pour diverses applications.
3. **Inerte** : il est inerte et ne dégage pas de substances nocives ni de polluants lorsqu'il est utilisé en horticulture ou en construction.

4. **Point de fusion** : la perlite a un point de fusion élevé, ce qui la rend adaptée aux applications ou une exposition à des températures élevées est requise, comme dans les matériaux ignifuges.
5. **Insolubilité** : la perlite est essentiellement insoluble dans des applications comme les milieux horticoles.
6. **Expansion** : l'une des propriétés chimiques clés de la perlite est sa capacité à se dilater lorsqu'elle est exposée à des températures élevées. Cette expansion résulte de la libération de vapeur d'eau emprisonnée au sein de sa structure lors de la formation volcanique.
7. **Versatilité** : les propriétés chimiques de la perlite, combinées à sa structure physique, en font un matériau polyvalent pour des utilisations allant de l'horticulture et de la filtration à l'isolation et à la production de granulats légers.

Une série d'analyses chimiques de minerais de perlite prélevée dans plusieurs endroits du monde est donnée dans le tableau II.7.

Tableau II.7. Analyses chimiques (% en masse) de perlite brute de divers pays. [38].

Origin	US	Greece	Turkey	Hungary	Yemen	Korea	Bulgaria	Slovakia
SiO ₂	65-77.5	71-75	71-75	68-75	65-75	68-69	70-80	68-73
Al ₂ O ₃	11-18	12-16	12.5-18	10-15	9.4-12.8	11.95-15.8	10-15	7.5-15
Na ₂ O	2.4-4.6	3.0-4.0	2.9-4.0	2.8-4.5	3.37-4.25	3.2-4.4	<10	2.5-5.0
K ₂ O	1.4-5.7	4.0-5.0	4.0-5.0	3.2-4.5	3.6-4.1	2-3.94	<10	2-5.5
Fe ₂ O ₃	0.5-2.2	0.5-2.0	0.1-1.5	1.0-2.5	2.68-3.66	0.7-1.63	<1.5	1.0-2.0
MgO	0.1-0.7	0.2-0.7	0.03-0.5	0.2-1.5	0.5-0.93	0.35-0.48	<1.0	<1.0
CaO	0.5-3.6	0.5-1.5	0.5-2.0	1.5-2.0	0.87-1.84	1.57-1.89	<1.5	0.5-2.0
Loss on ignition	2-5	2-5	4.1	2.0-5.0	0.35-3.94	NR	<5	3.0-4.1

On constate que la perlite se caractérise par une teneur élevée en silice (> 65%) et en alumine (7,5 à 18%). On notera également la teneur alcaline de 7 à 8,5%. Minéralogiquement, la perlite est constituée d'un verre volcanique naturel hydraté dans lequel sont incorporées de petites quantités (jusqu'à 20%) d'inclusions cristallines.

II.3.4. Utilisation de la perlite

La perlite est utilisée en mélange dans les substrats, à raison de 30 à 50 %. Elle est appréciée pour sa capacité alléger et drainer la terre et améliorer sa structure et sa stabilité. Elle est aussi utilisée pure pour les boutures et les semis et en culture hydroponique.

II.4 POUZZOLANES NATURELLES

Les matériaux pouzzolaniques sont employés d'une manière globale comme additifs (les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, la fumée de silice, le calcaire et les pouzzolanes naturelles) avec les liants aériens et hydrauliques dans le but d'améliorer certaines caractéristiques des mortiers et des bétons. Seul des ajouts bien définis permettent d'exploiter au mieux leurs propriétés et avantages [39]

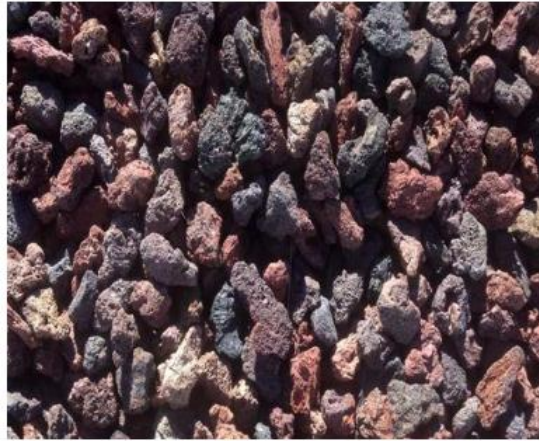


Figure II.5 : Matériaux pouzzolanique (rougeâtre) [39]

II.4.1. Définition :

Roche basaltique, la pouzzolane est un matériau extrêmement durable, qui ne craint aucune intempérie et ne se décompose pas, elle est constituée par des scories (projections) volcaniques basaltiques ou de composition proche. Elle possède une structure alvéolaire. La pouzzolane est généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise.

Les pouzzolanes sont classées en trois catégories :

- **Les constituants actifs:** phase vitreuse plus au moins altérée, opale, terre de diatomées, zéolites cristallisées.
- **Les constituants inertes:** phase cristallisée autre que les zéolites.
- **Les constituants nocifs:** substances organiques et argiles gonflantes.

II.4.2. Les caractéristiques physiques et chimiques de la pouzzolane :

Alors que le basalte se présente sous forme d'une roche compacte, les pouzzolanes se présentent sous forme de granulats à structure alvéolaire et scoriacée dont la couleur varie du rouge brique au noir (Figure II.3). L'oxyde de fer présent sous forme de magnétite ou d'hématite, peut être retenu comme indicateur coloré des pouzzolanes, puisqu'ils sont susceptibles de donner d'utiles renseignements sur les degrés d'oxydation atteints dans les pouzzolanes rencontrées. [40]

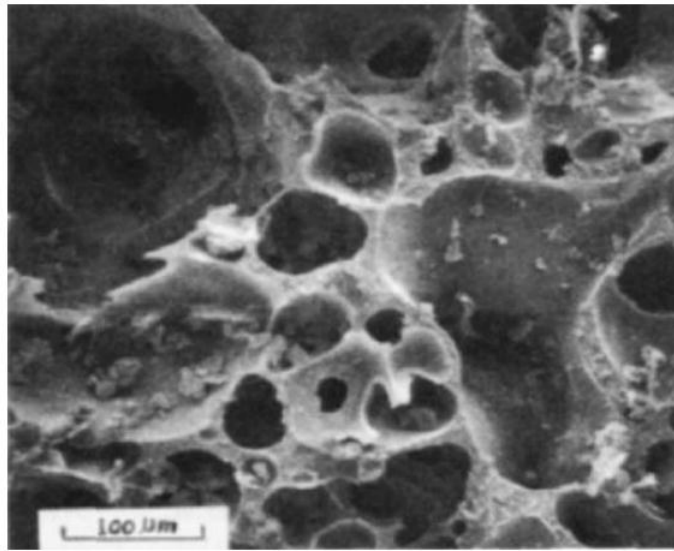


Figure II.6. Structure typique d'une scorie de terre de Santorin observée par microscopie électronique à balayage [41]

Les pouzzolanes sont composées essentiellement de la silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3). La partie restante contient de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres oxydes ainsi qu'un pourcentage de chaux (CaO). Une composition chimique en moyenne : 45% de silice, 15% d'alumine, 15% d'oxyde de fer. Elle contient également, de la chaux, du sodium, du potassium, et de nombreux oligoéléments.

Le tableau II.8 présente des compositions chimiques mesurées sur une vingtaine de pouzzolanes (la catégorie des pouzzolanes cohésives ou tufs désignent les gisements de roches consolidées en opposition aux gisements dits incohérents).

Tableau II.8. Compositions chimiques en pourcentage de quelques pouzzolanes à travers le monde [41]

Pouzzolane	Pays	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI	
incohérentes	Bacoli	Italie	53,1	17,9	4,3	9,1	1,2	3,1	7,6	0,65	3,1
	Barile	Italie	44,1	19,2	9,8	12,3	6,7	1,6	1,1	tr	4,4
	Salone	Italie	46,8	18,4	10,3	8,5	4,8	1,0	6,4	tr	3,8
	Vizzini	Italie	50,5	16,8	11,6	4,9	5,2	0,9	0,2	0,15	9,7
	Volvic	France	54,3	16,8				4,5	2,6		
	Terre de Santorin	Grèce	65,1	14,5	5,5	3,0	1,1				3,5
	Rhine	Allemagne	58,9	19,5	2,9	2,5	1,3	6,1	4,5		2,2
	Rhyolite	USA	65,7	15,9	2,5	3,4	1,3	5,0	1,9		3,4
	Furue shirasu	Japon	69,3	14,6	1,0	2,6		3,0	2,4		1,9
	Higashi Matsuyama	Japon	71,8	11,5	1,1	1,1	0,5	1,5	2,6		6,5
compactes (tufs)	Rhine trass	Allemagne	52,1	18,3	5,81	4,94	1,2	1,48	5,06		11
	Bavaria trass	Allemagne	62,5	16,5	4,41	3,39	0,94	1,91	2,06		7
	Selyp trass	Hongrie	55,7	15,2	6,43	2,83	1,01			0,26	16
	Ratka trass	Hongrie	73	12,3	2,71	2,76	0,41			0,1	6
	Yellow tuff	Italie	54,7	17,7	3,82	3,66	0,95	3,43	6,38		9
	Dacite tuff	Roumanie	67,7	11,3	2,66	3,73	1,64			0,18	7
	Gujarat tuff	Inde	40,9	12	14	14,6	1,45				12
	Trass K	Bulgarie	71,6	10	4,01	1,93	1,22			3,05	
	Zeolite	Japon	71,7	11,8	0,81	0,88	0,52	1,8	3,44	0,34	9
	Zeolite	Japon	71,1	11,8	2,57	2,07	0,15	1,66	1,33	0,27	10

II.4.3. Les Propriétés de la pouzzolane :

La pouzzolane présente dans certaines circonstances, une meilleure performance du ciment Portland comme par exemple. [42]

- **Faible développement de chaleur** : en fait, car il y a une quantité moindre de mâchefer Portland est inférieure à la teneur en aluminat tricalcique, du silicate tricalcique, qui sont les composants du clinker qui produisent une plus grande chaleur d'hydratation.

- **Une plus grande résistance à l'attaque du sulfate:** en effet, comme il y a une moindre quantité de clinker de Portland est inférieure à la teneur en aluminat tricalcique, qui est l'élément sensible du ciment à l'action des sulfates (ettringite).

- **Une plus grande résistance au délavage à l'eau:** en fait, car il y a une quantité moindre de clinker Portland est inférieure à la teneur en chaux. En outre, étant donné que la pouzzolane réagit avec la chaux, il y aura une réduction supplémentaire de la quantité d'hydroxyde de calcium libre. L'hydroxyde de calcium libre en présence d'eau agressive infiltre la création d'une structure poreuse et donc plus accessible aux agents extérieurs, par conséquent une teneur en chaux inférieure détermine une matrice de ciment plus compacte et une plus concrète durable.

II.4.4. Les Caractéristiques de la pouzzolane :

Tous les matériaux appelés « pouzzolanes » ne possèdent pas forcément cette propriété. On peut dans certains cas, activer les pouzzolanes par certains procédés :

- Ajouts de produits chimiques.
- Broyage à une finesse plus élevée.
- Traitement thermique.

En plus de ces caractéristiques, on cite les propriétés suivantes :

a- Propriétés hydrauliques :

La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme.

b- 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.

II.4.5. La pouzzolane naturelle en Algérie

La pouzzolane naturelle exploitée en Algérie est celle du gisement de Bou-Hamidi qui est situé à 2km 500 au Sud de Béni-Saf. L'exploitation des pouzzolanes montre que le cône est essentiellement formé de scories bien stratifiées, englobant de nombreuses enclaves, parmi lesquelles abondent les schistes et les calcaires qui forment les reliefs voisins.

Cette pouzzolane naturelle est essentiellement formée de scories et de pierres ponce bien stratifiées, de couleur variant du rouge au noir (Figure II.7).



Figure II.7. Différentes couleurs de scorie de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf. PZ1 : marron, PZ2 : brune, PZ3 : noire, PZ4 : rouge. [33]

La composition chimique de ces pouzzolanes est donnée dans le tableau II.9.

Tableau II.9. Compositions chimiques élémentaires des 4 pouzzolanes étudiées [33]

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaCO ₃
PZ1	14,69	39,01	13,10	9,17	0,02	1,03	2,52	4,16	16,3
PZ2	12,18	43,51	15,59	9,59	0,01	2,03	2,47	3,9	11,42
PZ3	11,45	43,30	14,68	9,84	0,02	1,64	2,4	4,42	12,25
PZ4	12,84	40,74	14,03	9,76	0,02	1,31	3,16	4,42	13,72

Selon Guenanou [2014] du point de vu minéralogique, les quatre pouzzolanes sont composées essentiellement d’Augite, Anorthoclase, Albite, Quartz, Hematite.

La pouzzolane naturelle de Béni-Saf est suffisamment connue suite à plusieurs études faites par les chercheurs algériens et elle est donc utilisée largement comme ajout cimentaire pouzzolanique dans plusieurs cimenteries algériennes (les cimenteries de Beni-Saf, Zahana, Oggez, Ain El kébira, Ain Touta, Hamma Bouziane et Hammam Edhalaa). [43]

II.5. CONCLUSION

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

Le présent chapitre rassemble des informations concernant la perlite et la pouzzolane naturelle. Il nous a permis de découvrir l'origine de ces matériaux pouzzolaniques et leurs caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques, sa production dans le monde et précisément en Algérie, ainsi que son activité pouzzolanique confirmée par plusieurs chercheurs.

CHAPITRE III :
SYNTHESE DES RECHERCHES
SUR LES MORTIERS A BASE DE
PERLITE ET DE POUZZOLANE

CHAPITRE III : SYNTHESE DES RECHERCHES SUR LES MORTIERS A BASE DE PERLITE ET DE POZZOLANE

III.1. INTRODUCTION

Au cours des années précédentes, de nombreuses études ont été réalisées sur l'impact des diverses proportions de perlite naturelle provenant de Hammam Bouhrara à Maghnia et la pouzzolane naturelle de Béni Saf, sur les différentes propriétés des mortiers. Les résultats des essais à l'état frais et à l'état durci réalisés par certains chercheurs seront abordés dans ce chapitre.

Ces essais concernent la consistance, la prise et la maniabilité des compositions de mortiers à base de perlite et pouzzolane à l'état frais, ainsi que les mesures d'absorption capillaire et les essais mécaniques de traction-compression à l'état durci.

III.3. SYNTHESE DES ETUDES SUR PATES ET MORTIERS A BASE DE PERLITE

III.3.1. Étude à l'état frais

III.3.1.1. Consistance et prise des pâtes de ciment

- Selon la recherche de Belaribi et all [44] qui a consisté en l'étude des propriétés physicomécaniques et thermiques des mortiers contenant 10, 15, 20 et 25% de perlite en substitution partielle au ciment, on constatait que les besoins en eau des pâtes contenant l'ajout de perlite naturelle sont supérieurs à celui du ciment sans ajout (figure III.1).

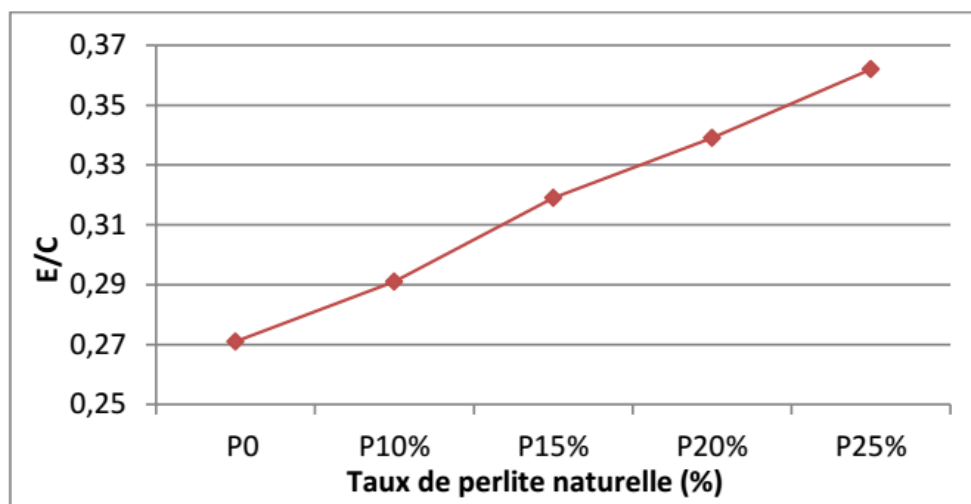


Figure III.1 : Variation des rapports E/C en fonction du dosage en perlite [44].

Par conséquent, à mesure que la quantité de la perlite augmente, les besoins en eau, pour avoir une consistance normale, augmente également. Ceci est dû probablement au fait que la poudre

de perlite a une surface spécifique plus grande, et a donc besoin de plus d'eau lors de la préparation de la pâte.

D'après les résultats de l'essai de prise, il apparait que l'ajout de la perlite affecte légèrement les temps de prise et qu'il ressort des résultats de la figure III.2, que remplacer le ciment par de la perlite naturelle accélère le processus d'absorption par rapport à une augmentation de la proportion d'ajout, ce qui est conformes avec les études effectuées par certains chercheurs [45].

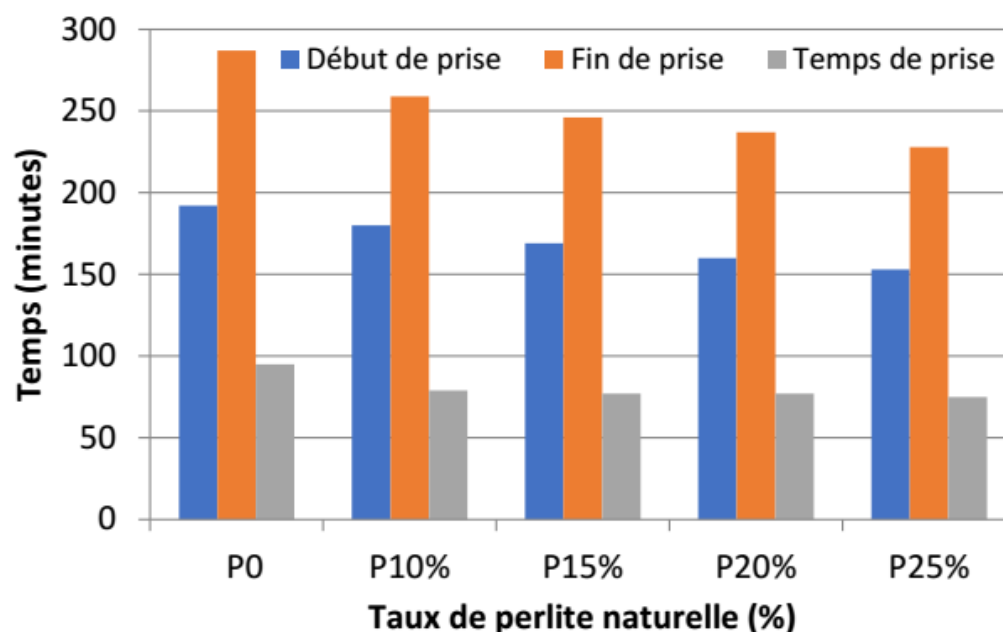


Figure III.2 : Evolution des temps de prise des différentes pâtes [44].

- Dans le même contexte, Chihaoui [46] a constaté que les besoins en eau des pâtes contenant la poudre de perlite naturelle sont supérieurs à celui du ciment sans ajout. Par conséquent, à mesure que la quantité de la perlite augmente, les besoins en eau augmentent (Figure III.3).

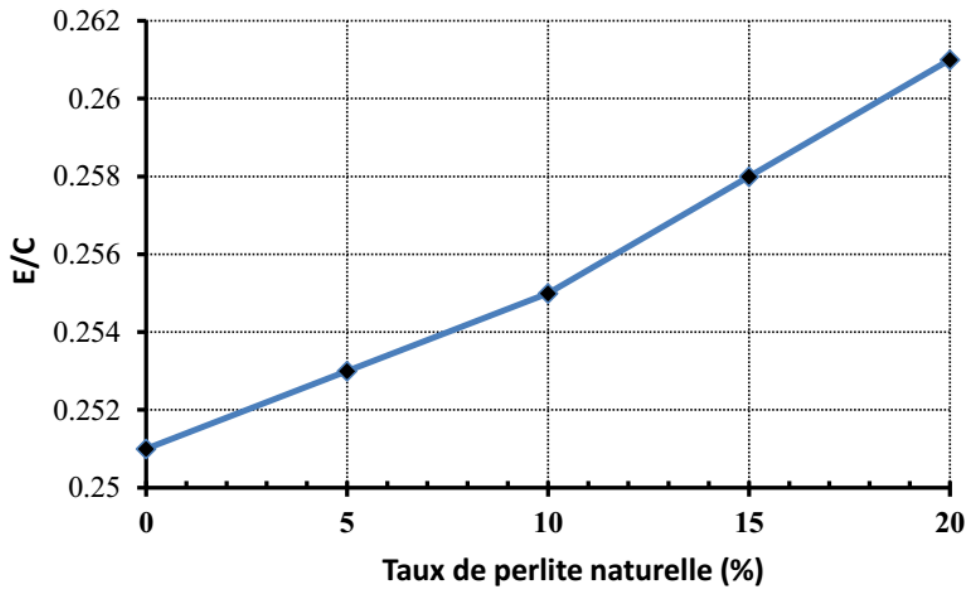


Figure III.3 : Variation du rapport E/C pour avoir des pâtes à consistance normale [46]

Il a aussi conclu que cela s'explique probablement par le fait que la poudre de perlite présente une surface spécifique plus importante et nécessite donc davantage d'eau lors de la préparation de la pâte.

Les résultats de prise mettent en évidence, comme la montre (Figure III.4), que les temps de prise (début et fin) sont accélérés avec l'ajout de la perlite naturelle.

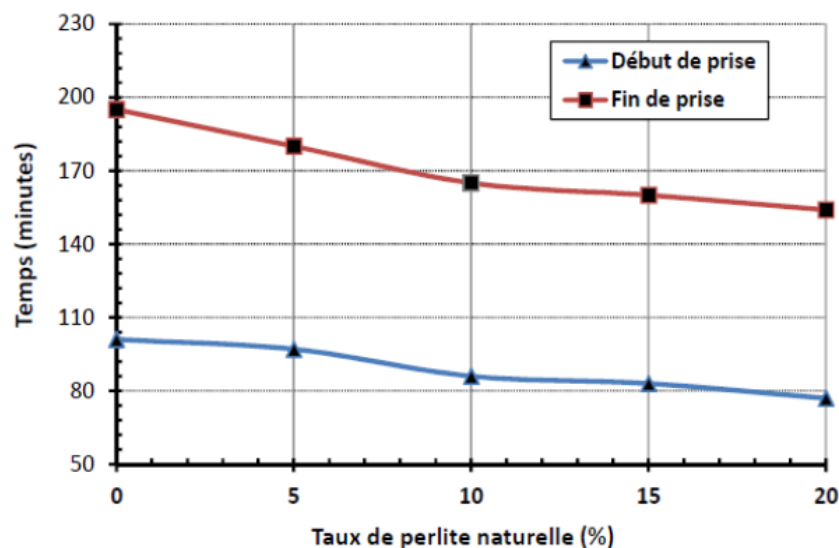


Figure III.4 : Évolution des temps de prise des différentes pâtes [46].

La perlite naturelle utilisée dans cette étude, renferme une teneur élevée en Al_2O_3 (13,68 %), son incorporation dans le ciment, augmente la quantité des composés d'aluminate du

mélange. En outre, l'accélération de la prise dans les pâtes incorporant la perlite naturelle peut être associée à la croissance de la formation d'hydrates de sulfate de calcium.

III.3.1.2. Maniabilité des mortiers

- D'après l'étude menée par Bourroubey [47], qui a étudié les caractéristiques physicomécaniques des mortiers contenant 10 et 20% de perlite en remplacement partiel du ciment, la maniabilité des mortiers diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la perlite (Figure III.5).

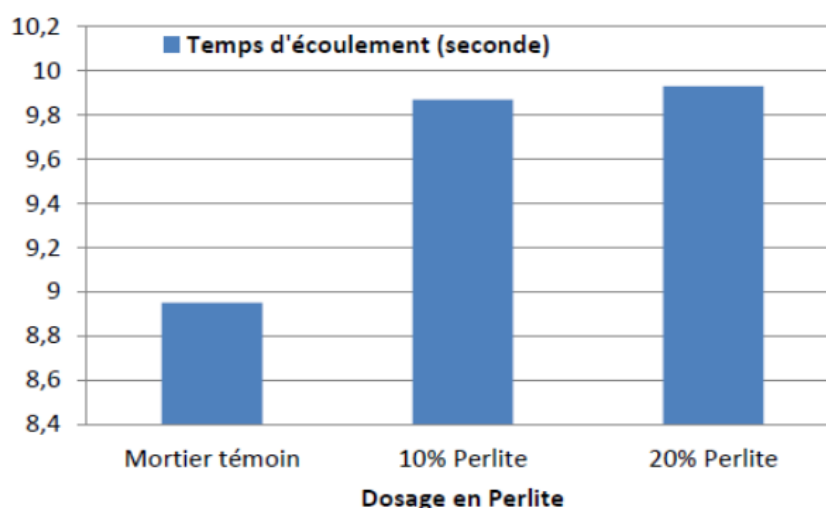


Figure III.5 Maniabilité des mortiers (temps de vibration) [47]

- Plusieurs chercheurs, [32] ; [48]. ont prouvées que le mortier avec du ciment Portland sans ajout présente une maniabilité supérieure aux mortiers pouzzolaniques. Ainsi, la maniabilité des mortiers pouzzolaniques diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la perlite. Ce qui prouve que l'augmentation du taux de la perlite accroît sensiblement la demande en eau [49] ; [35].
- Par ailleurs, Hamadache [35] a aussi travaillé sur la perlite avec des pourcentages différents de ceux de Chihaoui [46], les mélanges sont donnés dans le tableau III.1

Tableau III.1 : Influence de la perlite naturelle sur la maniabilité des mortiers à E/C=0,50[35].

Désignation de mortier	Perlite(%)	E/C	ETALEMENT (mm)	ETALEMENT(%)
M0	0	0.5	120	20
M10	10	0.5	116	16
M20	20	0.5	112	12
M30	30	0.5	106	06

Le mortier avec du ciment Portland sans ajout présente une maniabilité supérieure. Ainsi, que la maniabilité des mortiers avec perlite diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la perlite suivant la figure III.7. Cela prouve que la perlite accroît sensiblement la demande en eau. La croissance de la demande d'eau est principalement attribuée à l'augmentation progressive de la surface spécifique des liants pouzzolaniques et donc un fort appel aux molécules d'eau afin de mouiller toute la surface.

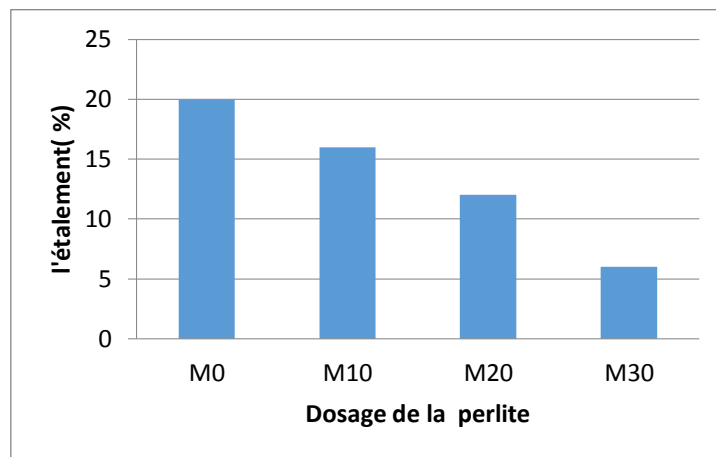


Figure III.7 : Variation de l'étalement en fonction des différents dosages de la perlite [35]

III.3.2. Étude à l'état durci

III.3.2.1. Absorption capillaire

- Selon l'étude de Belaribi [44] a constaté que l'accroissement de l'absorption d'eau relative à chaque mortier est observé entre le premier et le septième jour. Ainsi à distinguer qu'avec l'augmentation du pourcentage de la perlite le coefficient de l'absorption capillaire diminue ce qui rend l'effet de la substitution plus avantageuse et notamment le dosage de 20%. Ainsi, on peut dire que la perlite a contribué à sceller les capillaires résultant de l'interaction du ciment, de l'eau et du sable (Figure III.8).

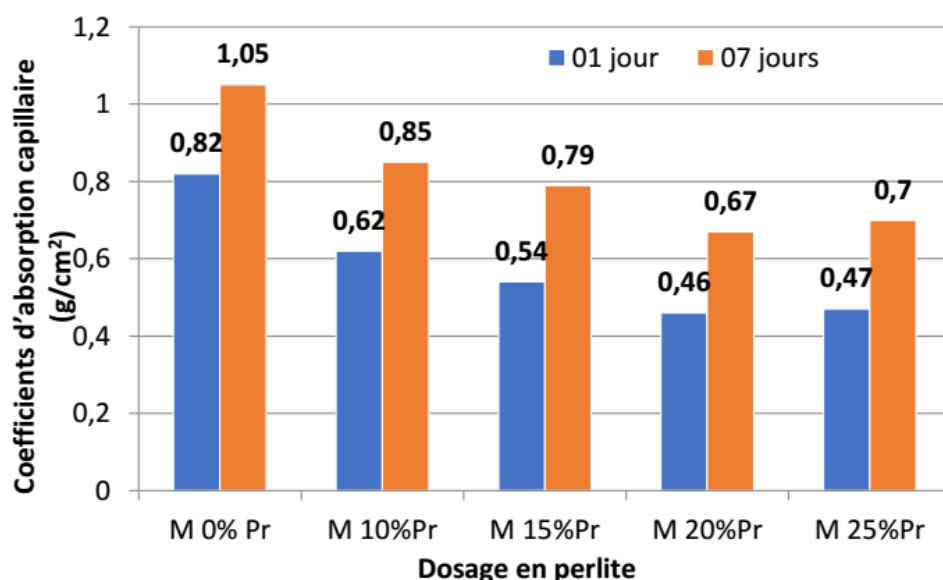


Figure III.8 : Evolution des coefficients d'absorption capillaire des différents mortiers [44].

- Les résultats issus des essais de Bourroubey [47] montrent l'influence de la perlite naturelle sur l'absorption d'eau des mortiers à l'âge de 1 et 7 jours, l'incorporation de la perlite à des taux de 10 et 20 % respectivement au ciment CPJ est très avantageuse puis qu'elle permet une réduction importante d'absorption capillaire. Les pores dans la pâte durcie et les interfaces entre cette dernière et les grains de sable sont remplis par ces ajouts et les pores capillaires sont par conséquent réduits (Figure III.9).

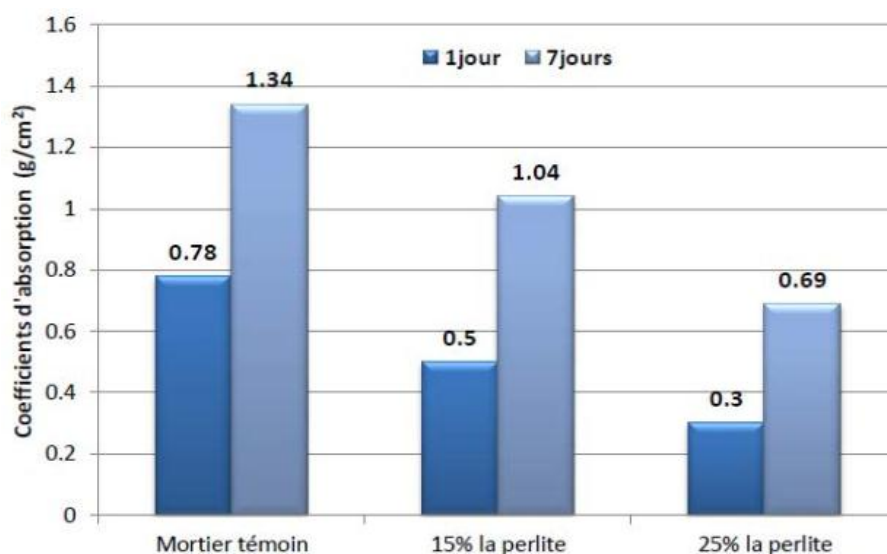


Figure III.9. Évolution des coefficients d'absorption capillaire des différents mortiers [47].

III.3.2.2. Résistance à la compression des mortiers

Selon Chihaoui [46], il a montré qu'à l'âge de 1 jour, les mortiers incorporant la perlite naturelle avaient pratiquement des résistances comparables (ou légèrement inférieures) à celle du mortier témoin.

A 7 jours, les valeurs de résistance à la compression des mortiers M5, M10, M15 et M20 sont inférieures à celles du mortier témoin, après 28 jours, les valeurs de résistance des mortiers incorporant la perlite naturelle ont commencé à augmenter plus rapidement et ont approché les résistances du mortier témoin.

A 90 jours, les résistances à la compression de M5, M10, M15 et M20 sont inférieures à celle du témoin. Ces résultats indiquent clairement que la différence entre la résistance du mortier témoin et celles des mortiers incorporant différents taux de perlite diminue continuellement avec le temps. (Figure III.10).

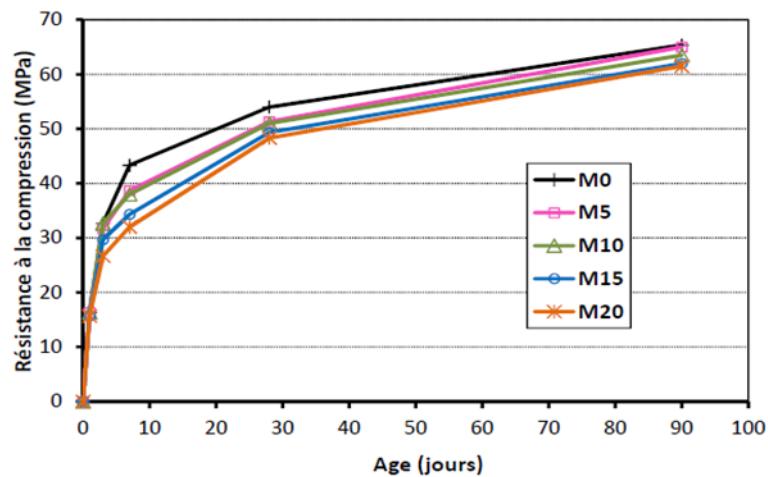


Figure III.10. Evolution de la résistance à la compression des différents mortiers [46]

D'après Belaribi [44], a montré qu'à des âges inférieurs à (14 jours), les valeurs de résistance à la compression des mortiers incorporant la perlite M10%, M15%, M20% et M25%. L'ajout de matériaux pouzzolaniques entraîne généralement une diminution des résistances à la compression au jeune âge (Figure III.11).

Après 28 jours d'âge, les valeurs de résistance des mortiers incorporant la perlite naturelle commencent à développer des performances mécaniques dépassant celles du mortier témoin. À long terme, les mortiers perlitiques affichent des résistances nettement meilleures par rapport à celles du mortier témoin avec une supériorité pour le mortier à base de 20% de

perlite à 180 jours, atteignant environ 52,45 MPa. Ceci est attribué probablement à l'activité pouzzolanique de l'ajout de la perlite qui est lente au jeune âge et s'accélère à long terme. Cette activité consiste à fixer la chaux libérée par le ciment au cours de son hydratation pour former de nouveaux silicates de calcium hydratés qui boostent la résistance.

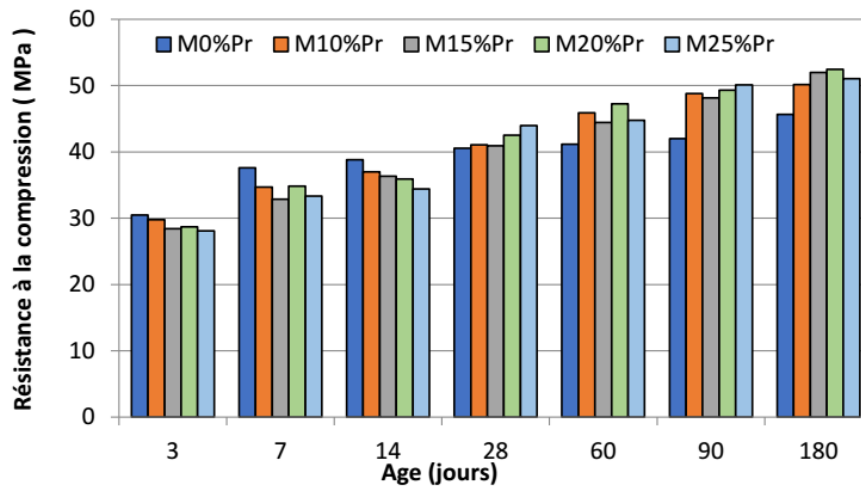


Figure III.11 : Evolution des résistances à la compression des différents mortiers.

III.3.2.3. Résistances à la traction des mortiers

- D'après l'étude de Hamadache [35] (Figure III.12), a constaté que les résistances à la traction de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute avant 28 jours. Au-delà de cette échéance une augmentation lente et une chute de résistance pour les mortiers avec 30% d'ajout de la perlite sont constatées.

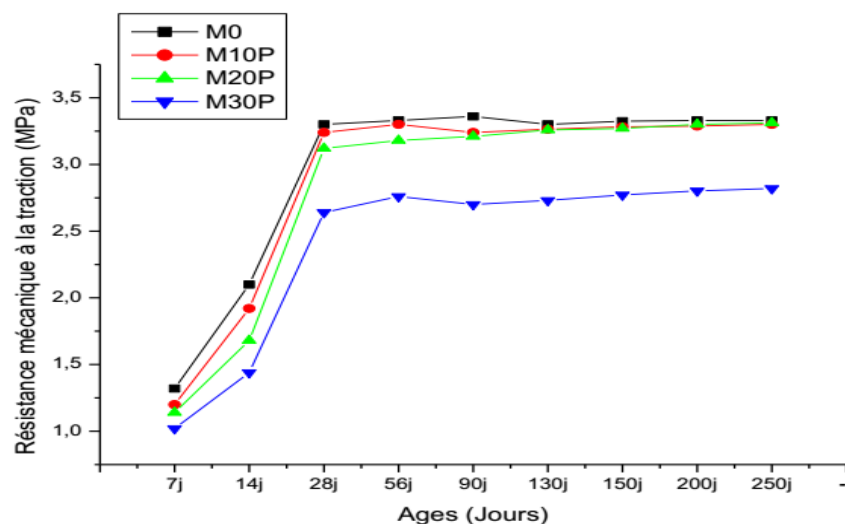


Figure III.12. Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des mortiers à base de perlite [35]

• Contrairement aux résultats précédents la résistance à la flexion augmente avec l'augmentation du pourcentage en perlite à l'âge 3, 7, 14 et 60 jours. A 28 jours le mortier à 10% de perlite affiche des résistances supérieures à celles des autres mortiers puis à long terme la résistance des mortiers à 20% de perlite et supérieure à celle des mortiers à 10% de perlite et au mortier de référence [50] (Figure III.13).

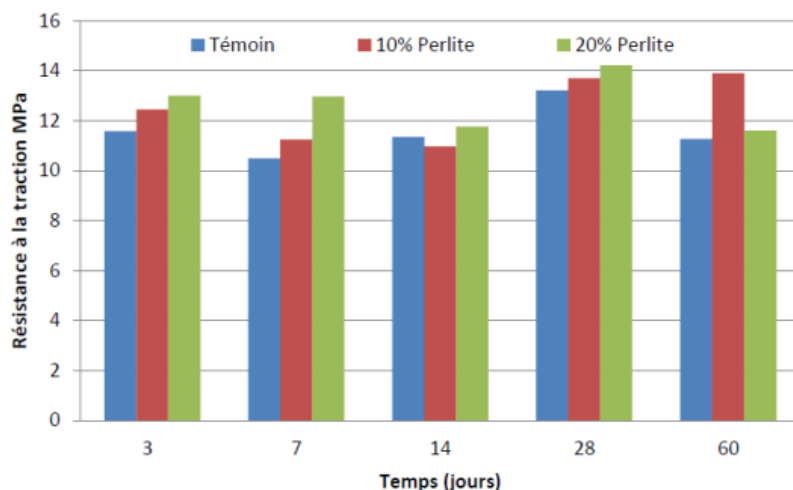


Figure III.13 : Evolution des résistances à la traction (MPa) [50].

III.4. SYNTHESE DES ETUDES SUR PATES ET MORTIERS A BASE DE POUZZOLANE NATURELLE

III.4.1. Étude à l'état frais

III.4.1.1. Consistance et prise des pâtes de ciment

• Ali Aichouba et al. [51] ont rapporté que la substitution du ciment par la pouzzolane naturelle (10 à 30%), cause l'accélération de la prise avec l'augmentation du pourcentage d'ajout. Ainsi, le ciment contenant 30% de pouzzolane naturelle présente une diminution de 32% pour le début de prise et 23% pour la fin de prise (Tableau III.2). [52] a constaté la même chose pour la pouzzolane naturelle de Beni-Saf, dont les temps de début et de fin de prise du ciment diminuent avec l'augmentation du pourcentage de cet ajout.

Tableau III.2 : Propriétés physiques des liants étudiés

Essais	Pourcentage de l'ajout						NA 442[7]
	0%	10%	15%	20%	25%	30%	
Consistance Normale (%)	23.4	24.2	24.4	24.8	25.2	26.8	
Début de prise (minute)	153	116	114	108	106	104	60 à 90 mn
Fin de prise (minute)	218	173	172	170	169	167	-
Expansion à Chaud (mm)	2.0	2.0	2.0	2.4	2.2	2.0	10

- Belaribi [53] a montré dans ses travaux, que l'ajout de la pouzzolane naturelle par substitution au ciment accélère le temps de début et de fin de prise, et cela augmente avec l'augmentation du pourcentage de la substitution. Par contre il a constaté que l'ajout jusqu'à 15% de deux différentes vases calcinées donne des temps de début de prise équivalents à ceux du ciment pur, mais au-delà de ce taux, le début de prise s'accélère.

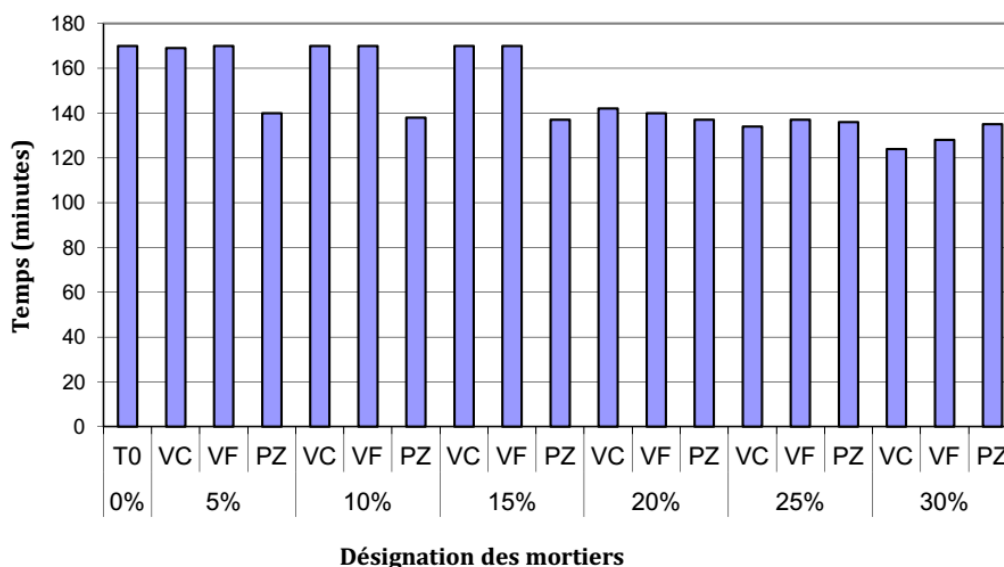


Figure III.14 : Les temps de prise des pâtes à base de vase calcinée de Chorfa (VC), vase de Fergoug (VF) et pouzzolane (PZ) [53]

- Les essais de consistance et de prise selon Laoufi [54] pour les mortiers, M10, M20 et M30. Les résultats de ces essais physiques de caractérisation des pâtes normalisées de ciment avec et sans PN sont présentés dans la Figure III.15. On voit clairement dans cette figure que les pâtes de ciment avec différents taux de pouzzolane ont besoin plus d'eau pour l'obtention d'une consistance normale, en outre, plus le pourcentage de PN est grand et plus la demande en eau est grande. Cette augmentation de la consistance normale des pâtes pouzzolaniques est due probablement à l'augmentation progressive de la surface spécifique du liant ce qui entraîne naturellement un fort appel aux molécules d'eau afin de mouiller toute la pâte. On

déduit donc que l’incorporation de la PN dans les mélanges modifie le besoin en eau, influe sur le processus d’hydratation du ciment et augmente les temps de début et de fin de prise proportionnellement aux pourcentages de la PN.

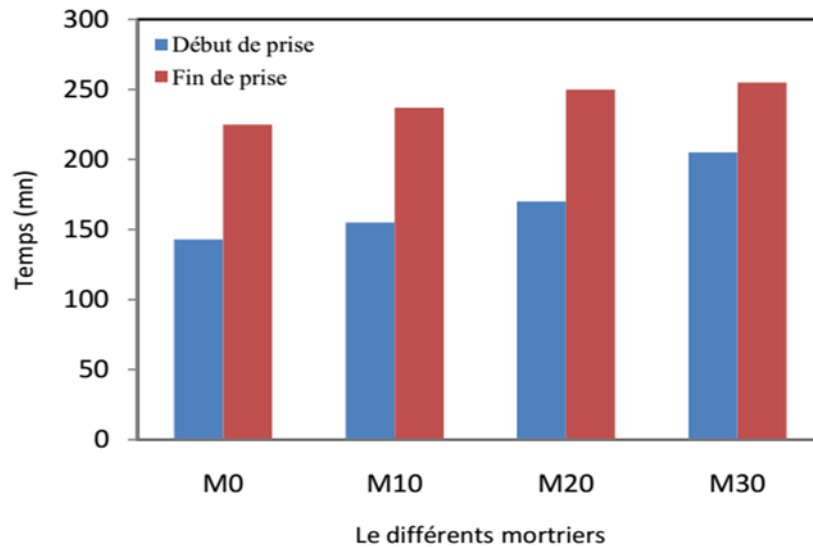


Figure III.15 : Influence de la PN sur le temps de prise [54]

III.4.1.2. Maniabilité des mortiers

- Laoufi [54] a montré dans ses travaux que la maniabilité des mortiers pouzzolaniques diminue avec l’augmentation du taux de substitution du ciment par la pouzzolane naturelle. Cette diminution de la maniabilité relative aux mortiers pouzzolaniques est traduite par l’augmentation proportionnelle de la surface spécifique des pates grâce à la grande finesse de la pouzzolane et donc une nécessité supplémentaire en eau. L’augmentation d’E/L des mortiers pouzzolaniques pour avoir un affaissement voisin de celle du mortier normalisé sans pouzzolane peut influencer négativement sur les caractéristiques mécaniques.

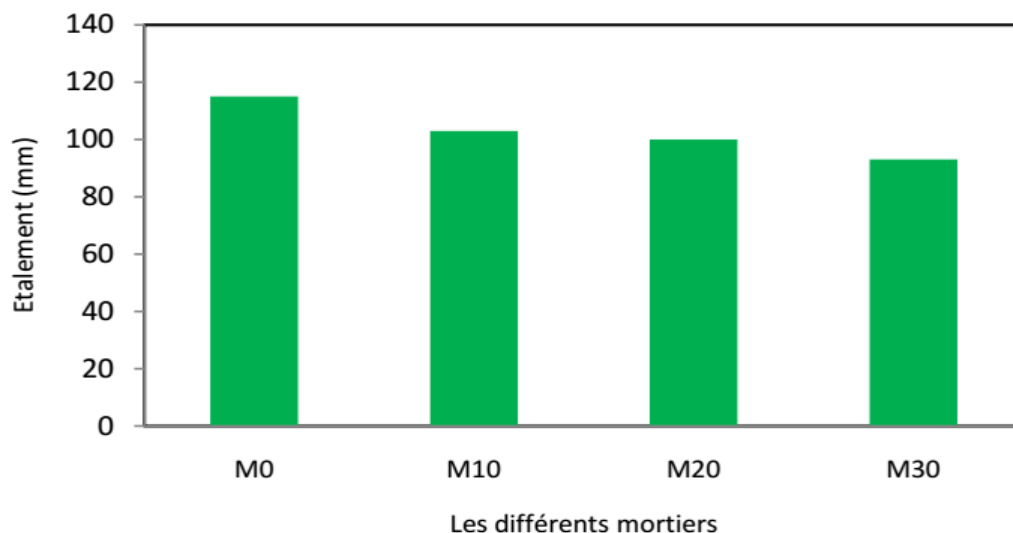


Figure III.16 : Influence de la PN sur la maniabilité des mortiers à e/l = 0.5 [54].

- Dans le même contexte, Belaribi [53] a montré que la maniabilité des mortiers pouzzolaniques diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la pouzzolane naturelle de Béni-Saf ou de la vase calcinée (Figure III.17). Pour garder une maniabilité plus ou moins constante, il a fallu augmenter la quantité d'adjuvant superplastifiant nécessaire à l'obtention d'un mélange maniable et ouvrable comparable à celui de ciment sans ajout.

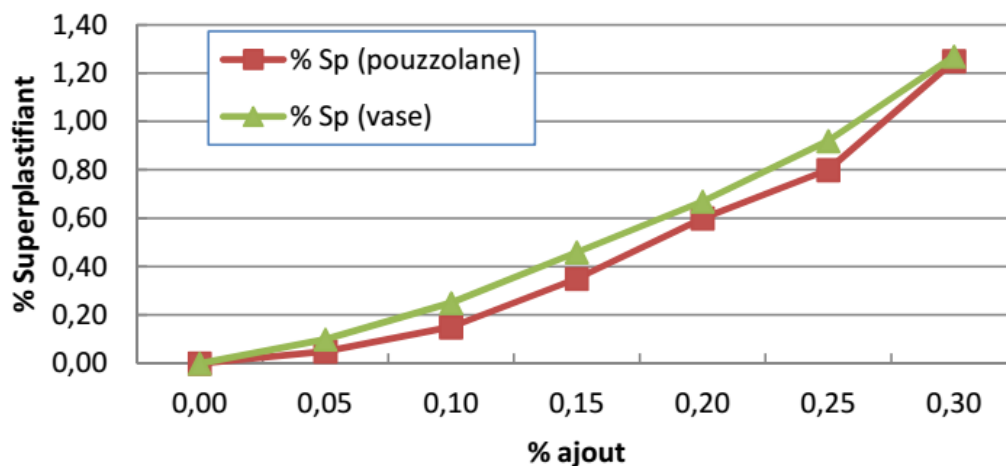


Figure III.17 : Evolution du pourcentage en Sp des mortiers à base de pouzzolane ou de vase en fonction du dosage de l'ajout [53].

III.4.2. Étude à l'état durci

III.4.2.1. Absorption capillaire

L'étude de Guenanou [32] à l'état durci et notamment l'essai l'absorptivité des mortiers à base (PR, PZ et FS), à 28, 60 et 90 jours. A remarqué que l'incorporation des ajouts engendre un effet avantageux sur l'absorptivité et donc obtenir une diminution de la taille des pores capillaires. En comparant entre les résultats des différents âges de conservation, nous pouvons constater la diminution de la valeur des coefficients de l'absorptivité avec l'âge (Figure III.18).

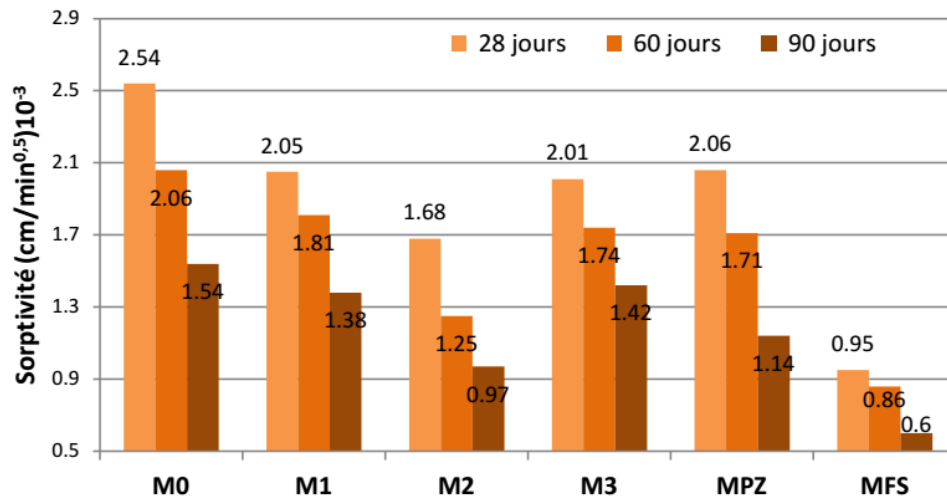


Figure III.18 : Evolution de l’absorptivité des différents mortiers [32].

III.4.2.2. Résistance à la compression des mortiers

• Ali-Aichouba et al. . [51] ont montré en étudiant l’effet de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf sur les propriétés d’un ciment à base de calcaire, que la substitution du ciment par la pouzzolane de 10 à 30 % engendre une diminution des résistances mécaniques aux jeunes âges (Figure III.19). Expliquant que cette diminution de résistance est due au fait que la réaction pouzzolanique n’est pas prédominante aux jeunes âges, ceci mène à une hydratation moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances.

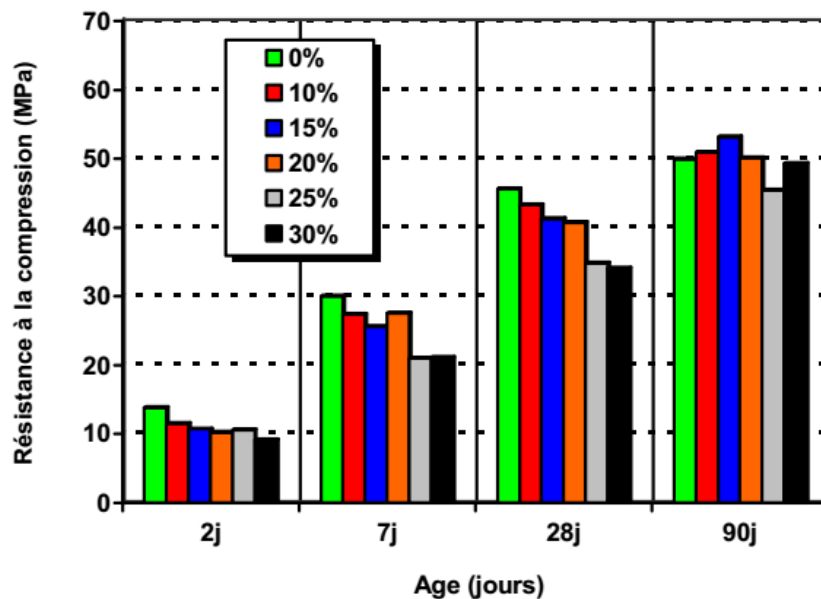


Figure III.19 : Développement de la résistance à la compression en fonction de l’âge [51]

Dû au fait qu'à long terme, la réaction pouzzolanique continue son effet en formant des C-S-H supplémentaires qui améliorent l'interface pâte-granulat, et donnent par la suite des résistances comparables et parfois élevées par rapport à celles du mortier contrôle à l'âge de 90 jours.

- Senhadji [48] a trouvé qu'au jeune âge, la résistance à la compression des mortiers incorporant la pouzzolane naturelle de Béni-Saf est inférieure à celle du mortier de référence. L'ajout de 15, 20 et 25% réduit la résistance à la compression, respectivement de 26, 50 et 43%, par rapport au mortier sans ajout, à 2 jours d'âge. Cette réduction est moins importante après 90 jours, respectivement, 9, 10, et 17%.
- Dans le même contexte, la figure III.20 montre les résultats trouvés par Belaribi [53] en substituant le ciment par (5, 10, 15, 20, 25 et 30%) de pouzzolane naturelle de Béni Saf sur les résistances en compression. Les résultats montrent que l'effet pouzzolanique pour les mélanges à base de 20, 25 et 30% de pouzzolane est remarquable à partir de 60 jours pour les mêmes raisons relatives à la réaction pouzzolanique.

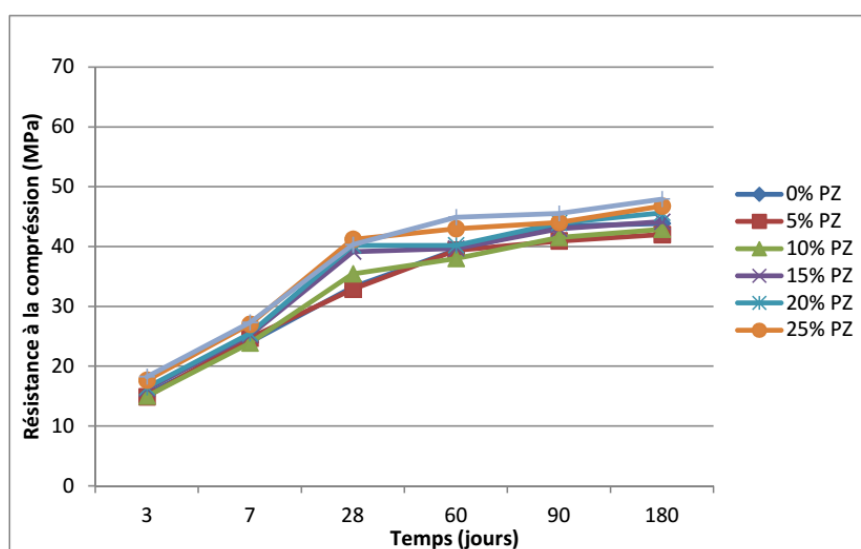


Figure III.20 : Evolution des résistances à la compression des mortiers à base de pouzzolane [53]

III.4.2.3. Résistances à la traction des mortiers

- Plusieurs chercheurs [55] ont utilisé la pouzzolane naturelle de Beni-Saf comme substitution de ciment, à des taux de substitution de 10, 20, 30 et 40%. Ils ont remarqué qu'au jeune âge (2 à 7 jours), les résistances à la flexion des mortiers contenant la pouzzolane sont faibles comparativement à celle du mortier témoin et deviennent comparables à long terme (28 et 90 jours) pour un taux de 30% (Figure III.21).

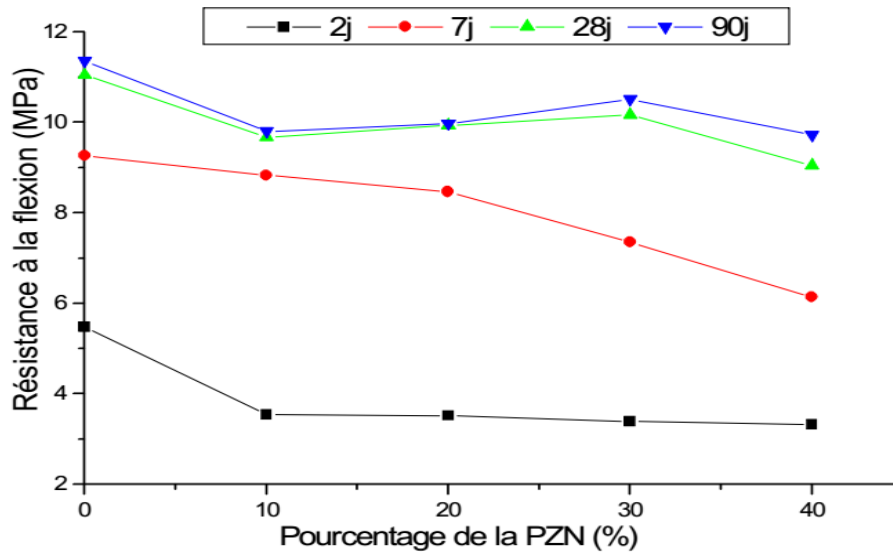


Figure III.21 : Effets des ajouts sur la résistance à la flexion des mortiers [55]

- Dans le même contexte, Ali-Aichouba et al. [51] ont montré que les mortiers pouzzolaniques développent leurs résistances plus faiblement que le mortier contrôle (Figure III.22). En effet, la résistance à la flexion d'un mortier contenant 30% de pouzzolane naturelle diminue de 12%, 32% et 10% à 2, 7 et 28 jours, respectivement, par rapport au mortier contrôle.

A 90 jours, les mortiers contenant de la pouzzolane naturelle ont des résistances qui dépassent celle du mortier contrôle. Ainsi, la résistance à la flexion d'un mortier contenant 25% de pouzzolane naturelle dépasse la résistance du mortier contrôle de 13%.

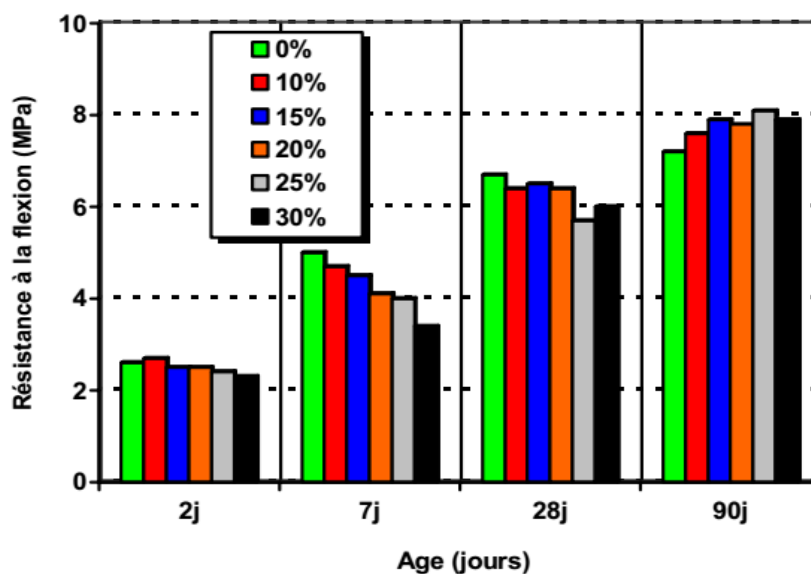


Figure III.22 : Développement de la résistance à la flexion en fonction de l'âge [51].

III.5. CONCLUSION

Ce chapitre présente les études menées sur les mortiers à base de perlite et de pouzzolane, à l'état frais et à l'état durci. L'analyse des résultats de la littérature confirme que la perlite et la pouzzolane sont des ajouts minéraux actifs.

Lorsqu'elle est ajoutée au ciment, elle modifie les propriétés physico-mécaniques des mortiers examinés. Cette influence varie d'une étude à l'autre en fonction de la composition chimique, de la finesse du liant, du rapport eau/ciment, et de l'utilisation éventuelle d'un adjuvant réducteur d'eau.

Les principales conclusions tirées de nos expériences sont :

- L'augmentation du rapport E/C est directement liée à la croissance du dosage en perlite et en pouzzolane pour avoir une consistance normale, ainsi que les temps de prise (début et fin) sont accélérés avec l'ajout de ces ajouts pouzzolaniques.
- pour obtenir un mélange maniable, l'utilisation d'un plastifiant ou l'augmentation de la quantité d'eau afin d'obtenir une maniabilité comparable à celle du mortier témoin est nécessaire, C'est pourquoi on conclut que la perlite et la pouzzolane diminuent la maniabilité des mortiers.
- Les ajouts (perlite et pouzzolane) réduisent l'absorption capillaire en diminuant la porosité de la pâte de ciment durcie et augmentent la résistivité de ces mortiers.
- Les résistances à la compression des mortiers à base de perlite et de pouzzolane développent des caractéristiques mécaniques dépassant celle du mortier témoin à long terme et cela dû aux l'effet pouzzolanique de ces ajouts, la traction de tous les mortiers augmente régulièrement avec l'âge où la résistance est supérieure par rapport celle du mortier témoin, ce qui montre que la résistance à la flexion augmente avec l'augmentation du pourcentage en perlite et de la pouzzolane.

PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

À la lumière de cette étude, nous avons pu faire le point sur la problématique essentielle : l'utilisation de la perlite dans les techniques de construction a été vivement recommandée par des chercheurs ; un matériau millénaire disponible dans des gisements naturels en Algérie.

L'intégration des matériaux pouzzolanique dans les nouvelles techniques de construction s'est réponde ces dernières années dans plusieurs pays d'Amérique et d'Europe mais restent faiblement utilisés en Algérie, ces produits répondent parfaitement aux critères requis pour les infrastructures modernes, en termes de confort, de sécurité, et de durée de vie.

En raison de ses caractéristiques, l'étude des mortiers à base de perlite est un domaine de recherche qui a un fort potentiel de développement. Cependant, même si les chercheurs s'intéressent de plus en plus à ce matériau (la perlite), les mortiers à base de perlite ne sont pas encore acceptés comme matériau de construction et leur utilisation reste encore limitée. Les propriétés de ce mortier sont intéressantes à l'état frais et à l'état durci. Il est donc crucial qu'il soit utilisé dans l'industrie du bâtiment

Nous allons tenter d'apporter par le biais de notre modeste travail des connaissances par notre contribution qui a pour objectif de fabriquer un mortier de qualité remarquable avec des matériaux locaux à partir d'une substitution d'une quantité de ciment composé par des proportions de perlite de la région de Maghnia et la pouzzolane de Béni-saf et donc à évaluer leurs effets sur l'absorption capillaire et les résistances mécaniques.

Une question à laquelle une réponse s'impose est :

Est-il envisageable de fabriquer un mortier conforme aux normes et ayant un bon comportement mécanique en substituant jusqu'à 25 % d'une quantité de ciment par une quantité d'ajouts pouzzolaniques (perlite et pouzzolane) en volume?

Pour répondre à cette question un programme expérimental a été engagé afin d'étudier les différents comportements à l'état frais et durci des mortiers binaires à base de (15% de perlite) et des mortiers ternaires (15% perlite+5% pouzzolane et 15% perlite+10% pouzzolane) et d'un mortier sans ajout en guise de comparaison.

PARTIE II :
MATERIAUX ET METHODES
EXPERIMENTALES

CHAPITRE I

MATERIAUX UTILISES

CHAPITRE I : MATERIAUX UTILISES

I.1. INTRODUCTION

Ce chapitre a été consacré à l'identification et à la caractérisation des matériaux utilisés, tels que le sable normalisé, le ciment, la perlite, la pouzzolane, l'eau et les adjuvants. Le travail que nous présentons met en évidence la perlite provenant de Maghnia et la pouzzolane de Béni-saf dans le but de ses exploitations en substitution partielle au ciment (substitution en volume), il s'agit de comparer l'influence de ces ajouts minéraux sur les différents mortiers incorporant ces matériaux.

Nous avons effectué une série d'essais physiques et mécaniques dans les laboratoires suivants :

- Laboratoire pédagogique de matériaux de construction, Département de Génie Civil de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.
- Laboratoire Construction, Transport et Protection de l'Environnement (LCTPE), Faculté des Sciences, Université de Mostaganem.

I.2. CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES :

I.2.1. Le ciment

Le ciment utilisé dans tous les essais est un résistant aux sulfates (CRS) CPA CEM I 42,5 provenant du groupe GICA. Le choix particulier de ce type de ciment se justifie par le fait qu'il ne contient aucun ajout minéral. Ce choix nous permet de justifier nos conclusions.

Ce ciment présente une résistance moyenne en compression à 28 jours de 42,5 MPa, est constitué de : 95% de clinker, des constituants secondaires (de 0 à 5%) peuvent être incorporés dans ce ciment et du sulfate de calcium sous forme de gypse est rajouté en tant que régulateur de prise.

La composition chimique du ciment est représentée dans le tableau I.1.

Tableau I.1 : compositions élémentaire chimique de ciment CRS en%

Élément chimique	Teneur %
Na ₂ O	0.20
MgO	2
Al ₂ O ₃	4.50
SiO ₂	20.00
SO ₃	2.50
Cl	0.02
K ₂ O	0.60

CaO	63.10
Fe ₂ O ₃	5.50

La composition minéralogique du clinker est donnée par le tableau I.2, selon la formule de Bogue.

$$C_3S = 4,07 (CaO) - 7,60 (SiO_2) - 6,72 (Al_2O_3) - 1,43 (Fe_2O_3) - 2,85 (SO_3)$$

$$C_2S = 2,87 (SiO_2) - 0,75 (C_3S)$$

$$C_3A = 2,65 (Al_2O_3) - 1,69 (Fe_2O_3)$$

$$C_4AF = 3,04 (Fe_2O_3)$$

Tableau I.2 : compositions chimique de clinker (%)

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
59.59%	12.71%	2.63%	16.72%

- La masse volumique apparente est obtenue par la pesée d'un récipient d'un litre rempli de ciment comme le montre la figure I.1.



Figure I.1. La masse volumique apparente du ciment.

- La masse volumique absolue du ciment a été déterminée selon la NF P 18-555 par le pycnomètre et le benzène figure I.2.



Figure I.2 : Masse volumique absolue de ciment.

Les caractéristiques physiques du ciment utilisé sont montrées dans le tableau **Tableau.I.3**

Tableau.I.3. Caractéristiques physiques du ciment CRS

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.01
Masse volumique absolue (g/cm ³)	3.13
Finesse (cm ² /g)	2869
Perte de feu	≤1%
Résidu insoluble	0.5 % - 1 %
Densité	0.950 à 1.10
Refus sur tamis 45 micron	≥ 20%

I.2.2. La perlite

La perlite utilisée dans cette étude est d'origine volcanique extraite du gisement de Hammam Boughrara situé à Maghniya [32], Ce matériau sous forme de roches, après concassage a été séché à 105 °c dans une étuve pendant 24 heures pour éliminer l'eau libre, puis broyé (Figure I.3)

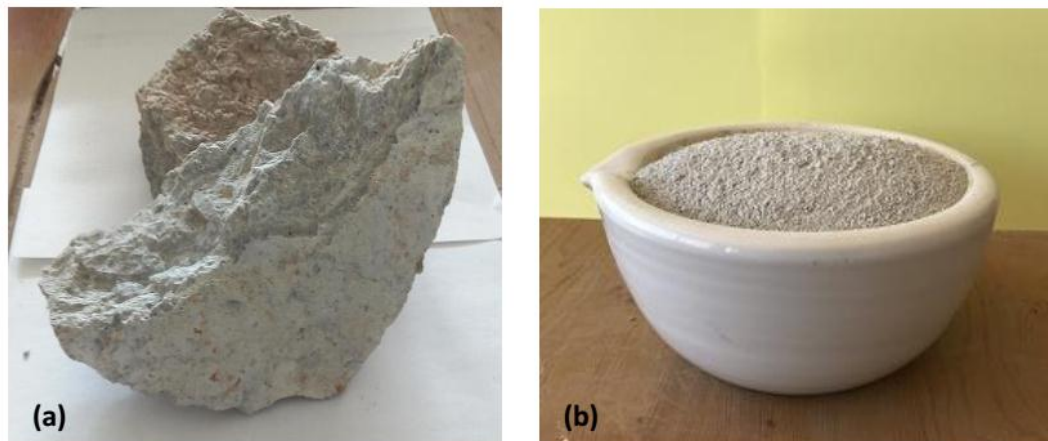


Figure 1.3 – (a) Roche de la perlite naturelle avant broyage, (b) Poudre de la perlite naturelle après broyage et tamisage.

La composition chimique de la perlite broyée est montrée dans le tableau 4.

Tableau 4. Composition chimique élémentaire de la perlite naturelle [46].

Composants	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	PAF
Contenu (%)	2,38	72,81	13,68	2,16	0,01	3,64	0,97	0,05	4,20

Les caractéristiques physiques de la perlite naturelle, est donnée dans le tableau I.5.

Tableau I.5. Caractéristiques physiques de la perlite naturelle [46].

Désignation	Propriété	Désignation	Propriété
Couleur	Gris	La finesse au tamis 45 μ m	12 %
Masse volumique absolue	2.6	Surface spécifique de Blaine	4230 cm ² /g

Le diagramme (Figure I.4) montre que la perlite naturelle est composée de minéraux courants pour une substance volcanique avec principalement du quartz, anorthite et biotite. Aucun minéral hydraulique n'a été reconnu dans ce matériau, néanmoins le décollement de la ligne de base du diffractogramme sous forme d'une bosse nous indique la présence d'une phase amorphe potentiellement réactive.

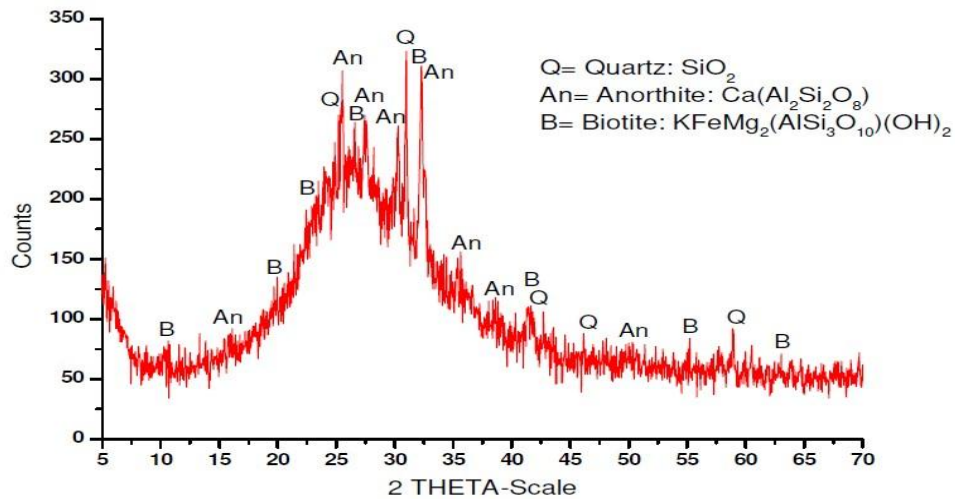


Figure I.4. Le diffractogramme aux rayons X de la perlite naturelle [46].

I.2.3. La pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle utilisée est d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamidi situé au Sud de Béni-Saf (Algérie). Cette pouzzolane est fournie sous forme de roches concassées de type pierre ponce et scorie (Figure I.5). Pour pouvoir l'utiliser comme substitut dans la composition des pâtes et mortiers, nous avons d'abord procédé à son étuvage à 105°C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage, nous l'avons ensuite complètement broyé puis passé au tamis de $80\ \mu\text{m}$.



Figure I.5: La pouzzolane naturelle utilisée, avant broyage et après broyage.

Les caractéristiques chimiques de la pouzzolane naturelle de Bni-Saf sont représentées dans le tableau I.6.

Tableau I.6 : composition chimique élémentaire de la pouzzolane naturelle de Bni-Saf [44]

Elément (Teneur en %)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PF
Pouzzolane naturelle	45.96	16.32	9.41	9.72	4.57	0.11	1.59	0.47	4.85

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

Les caractéristiques physiques de la pouzzolane sont données dans les tableaux Tableau I.7.

Tableau I.7 : caractéristiques physiques de la pouzzolane naturelle de Baní-Saf[44]

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique apparente de la vase (g/cm ³)	0.81
Masse volumique absolue de la vase (g/cm ³)	2,73
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g)	4453

La composition minéralogique de la pouzzolane est obtenue par DRX, elle a donné les résultats illustrés dans la figure I.6.

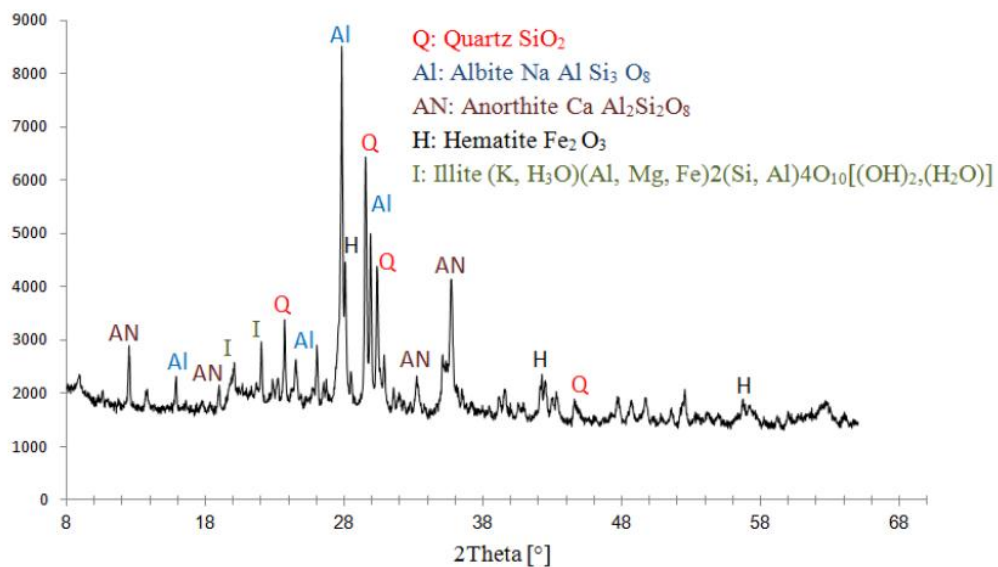


Figure I.6. L'analyse aux rayons X de PZ [32].

1.2.4. Le sable

Le sable utilisé est un sable siliceux provenant de la société Adwan, zone industrielle Fornaka à Mostaganem, ouest algérien. Il est initialement préparé pour être classé suivant les normes françaises NF P 15-403 (Figure I.7).



Figure I.7. Le sable siliceux de la société Adwan.

Le sable normalisé est un sable naturel , siliceux , il est propre les grains sont de forme isométrique et arrondie , elle préparé dans labo de défirrent fraction

Le sable est conditionné en sachets contenant chacune de 1350 ± 5 g.

La composition chimique du sable, est donnée dans le tableau I.8.

Tableau I.8. Composition chimique du sable (Adwan) [56].

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	TiO ₂	H ₂ O	L.O.I
97.2%	3.70%	0.30%	0.003%	0.240%	0.023%	0.02%	0.24%

- Les masses volumiques apparentes et absolues sont montrées par la figure I.8 et I.9.



Figure I.8. La masse volumique apparente du sable.

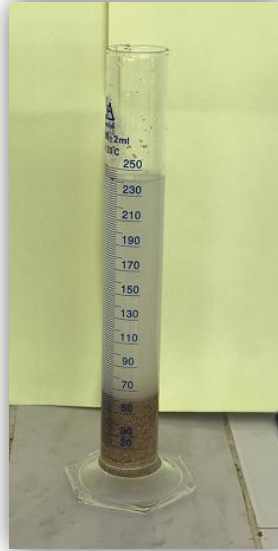


Figure I.9. La masse volumique absolue du sable.

- L'équivalent de sable est déterminé avec deux méthodes différentes visuelles et avec le piston. La procédure de l'équivalent de sable visuel est montrée dans la figure I.10.

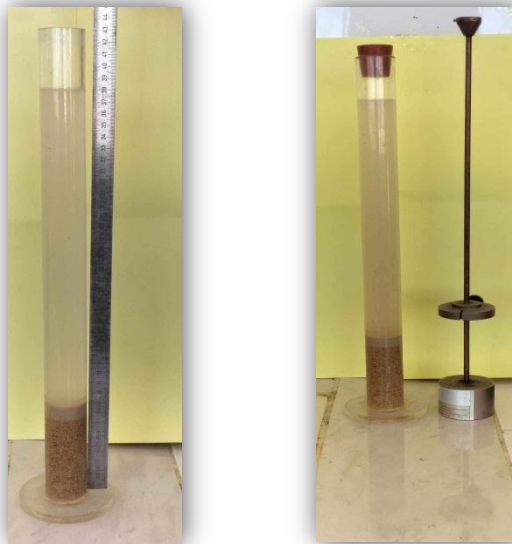


Figure I.10 : Essai équivalents de sable

D'après l'équivalent de sable on conclut que le sable utilisé est très propre : absence presque totale des fines mesurer suivant la norme [NF EN18]

- La composition granulométrique déterminé par tamisage est conforme aux exigences des normes EN 196-1 voir le tableau I.9 et la figure I.11.

Tableau I.9. La granulométrie du sable utilisé.

Tamis (mm)	1.6	1	0.5	0.16	0.08	Fond
Refus (g)	94.5	351	459	270	162	13.5
Tamisât (%)	93	67	33	13	1	/

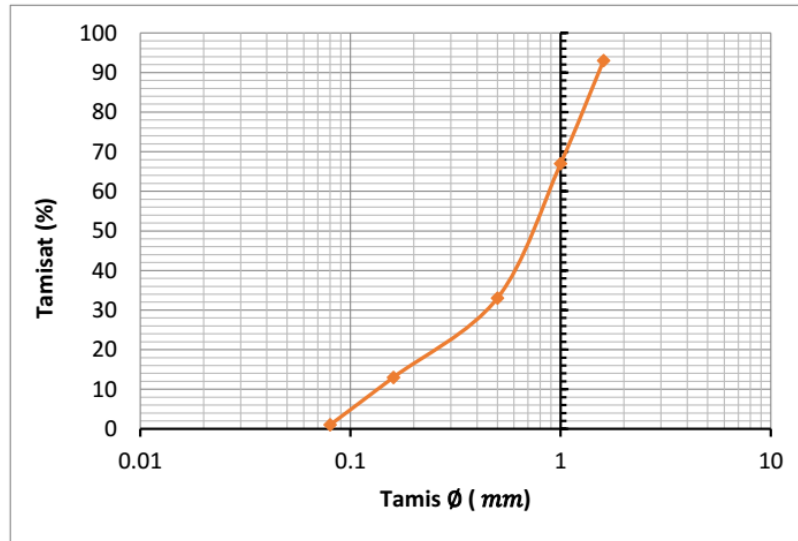


Figure I.11. Courbe granulométrique du sable [56]

Les caractéristiques physiques du sable sont représentées dans le tableau I.10.

Tableau I.10. Les caractéristiques physiques du sable siliceux.

Caractéristiques		Sable siliceux
Masse volumique apparente (g/cm ³)		1.61
Masse volumique absolue (g/cm ³)		2.7
Equivalent de sable (%)	Visuel	95.64
	Piston	91.75
Module de finesse		1.91
Pourcentage de fines (%)		1.2

I.2.5. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la préparation des pâtes et mortiers est l'eau potable du robinet.

I.2.6. L'adjuvant

L'adjuvant utilisé dans nos mélanges est le PLASTIMENT BV 40 qui est un plastifiant réducteur d'eau énergétique qui augmente la compacité du béton et facilite sa mise en place

entraînant ainsi une amélioration des résistances mécaniques et diminue l'absorption capillaire des bétons. Il permet de réduire l'eau de gâchage d'environ 10 % sans diminuer la maniabilité du témoin et d'améliorer la maniabilité à teneur en eau constante (Voir fiche technique en annexe A). Les caractéristiques physiques et chimiques du BV 40 sont résumées dans le tableau I.11.

Tableau I.11 : Caractéristiques physiques et chimique de l'adjuvant

Forme	LIQUIDE
Couleur	Brun foncé
Densité	1,180 ± 0,025
Durée de Conservation	3 ans
pH	4,5 ± 1.
Teneur Totale en Ions Chlorure	< 0,1 %.
Extrait Sec	36,6 à 40,4 %
Plage d'utilisation recommandée	0,3 à 1% du poids du ciment
Conditionnement	Fût de 250 kg Cubi de 1100 kg
Équivalent Oxyde de Sodium	≤ 2,0 %.

I.3. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons caractérisé les différents matériaux utilisés ciment, perlite, pouzzolane sable et adjuvant. C'est une étape nécessaire avant d'entamer l'étude expérimentale de ces matériaux cimentaires. Ces matériaux servent à la formulation des pâtes et mortiers. La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux.

CHAPITRE II

METHODES EXPERIMENTALES

CHAPITRE II : METHODES EXPERIMENTALES

II.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons exposer les différents essais expérimentaux au cours de notre recherche. Ces essais sont relatifs à l'étude des propriétés des matériaux cimentaires (pâtes et mortiers) binaires à base de perlite et de pouzzolane naturelle, ainsi que des formulations témoins pour le besoin de comparaison.

Nous précisons également les différentes méthodes d'essais utilisés selon l'état frais et l'état durci de notre mélange ainsi que leurs modes opératoires et les références de leurs normes correspondantes.

Parmi les essais effectués on site : la consistance et temps de prise des pâtes, la maniabilité des différents mortiers à l'état frais, l'absorption capillaire, et essais mécaniques (traction et compression) à l'état durci.

II.2. ESSAIS SUR PATES

II.2.1. Formulation et préparation des pâtes

Différentes pâtes ont été produits par la substitution du ciment résiste aux sulfates (CRS) avec diverses proportions de la perlite naturelle et de pouzzolane (15, 20, et 25% du poids du ciment). Le tableau II.1 fournit les détails de différents liants composés.

Tableau II.1. Détails des différents liants composés.

Désignatio	Liants	Ciment (g)	Perlite (g)	Pouzzolane (g)
P0	100 % CEM I	500	0	0
P15	85% CEM I + 15% P	425	75	0
P15/5	80% CEM I + 15% Pr+5%Pz	400	75	25
P15/10	75% CEM I + 15% Pr+10%Pz	375	75	50

La préparation de la pâte de différents liants est faite conformément aux prescriptions de la Norme [EN-196-3]. Le liant et l'eau ont été préalablement pesés sur une balance de précision ± 0.01 g. Le mélange a été malaxé dans un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 3 litres.

II.2.2. Essai de consistance normal

La consistance de la pâte de ciment (pourcentage d'eau/pâte pure) caractérise sa fluidité. Pour apprécier la consistance du ciment résistante aux sulfates on a effectué l'essai avec l'appareil de Vicat conformément à la norme [EN-196-3].

II.2.2.1. Objectif de l'essai

La consistance de la pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité. L'objectif est de définir une telle consistance dite « CONSISTANCE NORMALISEE ».

II.2.2.2. Principe d'essai

La consistance est évaluée ici en mesurant l'enfoncement dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante (**Figure 1**). L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide. La consistance évaluée de cette manière sera appelée « CONSISTANCE VICAT ».

II.2.2.3. Équipement nécessaire

- Un malaxeur.
- Un appareil de VICAT.

- Une balance permettant de peser à 1 g près.
- Une Chronomètre précis à 1 s près.

II.2.2.4. Conduite de l'essai

Préparer 500 g de ciment, une pâte pure de rapport E/C=0,25 (rapport de départ).

Verser l'eau dans la cuve du malaxeur contenant le ciment.

Tableau II.2 : Opérations du malaxage [LA NORME EN 196-3].

Opération	Introduction de l'eau	Introduction du ciment	Malaxage	Raclage de la cuve	Malaxage
durée	5 < t < 10 sec		90 sec	15 sec	90 sec
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente	Arrêt	Vitesse lente

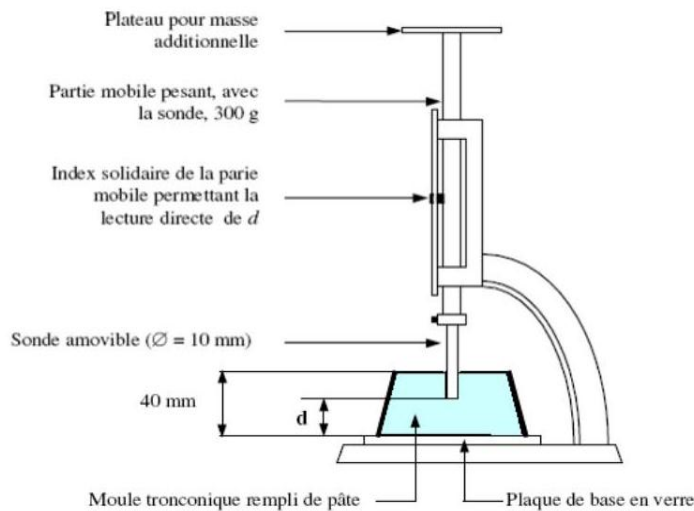


Figure II.1. Appareil de Vicat muni d'une sonde de consistance

Quatre minutes après le début du malaxage

La sonde est amenée à la surface supérieure de l'échantillon (moule tronconique) et relâchée sans élan. La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), on mesure la distance d séparant l'extrémité de la sonde et de la plaque de base.

Cette distance (d) caractérise la consistance de la pâte étudiée

- Si $d = 6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, l'essai est concluant et la consistance est normale.

- Si $d \leq 5$ mm, la pâte est trop mouillée et il faut recommencer l'essai avec moins d'eau.
- Si $d \geq 7$ mm, la pâte est trop ferme et il faut recommencer l'essai avec plus d'eau.

II.2.3. Mesure des temps de début et fin de prise de la pâte

II.2.3.1. Objectif de l'essai

Il est nécessaire de connaître le début et la fin de prise des pâtes de ciment (des liants hydrauliques en général) afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers et des bétons qui seront ensuite confectionnés.

II.2.3.2. Principe d'essai

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée à l'aide de l'appareil de Vicat qui permet la mesure de l'enfoncement d'une aiguille dans la pâte et le temps correspondant.

II.2.3.3. Equipement nécessaire

- Salle climatisée : L'essai doit se dérouler dans une salle, dont la température est de $20^{\circ} \text{C} \pm 1^{\circ} \text{C}$ et dont l'humidité relative est supérieure à 90%. A défaut d'une telle humidité relative, l'échantillon testé pourra, entre deux mesures, être entreposé dans de l'eau maintenue à $20^{\circ} \text{C} \pm 1^{\circ} \text{C}$.

- Malaxeur normalisé

- Appareil de Vicat.

- Balance précise à 0,1 g près.

- Chronomètre précise à 0,1 s près

II.2.3.14. Conduite de l'essai

Il s'agit de confectionner une pâte de consistance normalisée voir Tableau II.2.

Avant de commencer l'essai, il faut mouiller et égoutter le godet et le batteur du malaxeur

1- préparer une pâte à consistance normalisée. Le temps t_0 est celui de du moment de gâchage du liant.

2- remplir immédiatement de pâte le moule tronconique et araser la surface en prenant appui sur le bord du moule.

3- régler le niveau zéro de l'aiguille.

4- centrer le moule dans l'axe de la sonde, abaisser la sonde avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte, et desserrer la vis pour que la sonde pénètre sous son poids propre dans la pâte.

5- après 30 secondes, noter la valeur de l'enfoncement " d " lue sur l'index de l'appareil.

6- placer le moule dans une armoire humide (20 ± 1) ° C et 90% d'humidité relative (un bain d'eau dans lequel il est possible de maintenir les moule remplies à (20 ± 1) °C peut être utilisé , pourvu qu'il puisse être prouvé que les mêmes résultats d'essai sont obtenus.

7- procéder de la même façon à des intervalles de temps de 5 mn près, jusqu'à l'observation du début de prise et la fin de prise.

- si $d = 4\text{mm} \pm 1\text{ mm}$ on dit que le début de prise est atteint, ce moment, mesurer à partir du début du malaxage, est appelé << temps de début de prise >>.

Le temps de fin de prise est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0.5 mm
Voir figure II.2. et II.3.

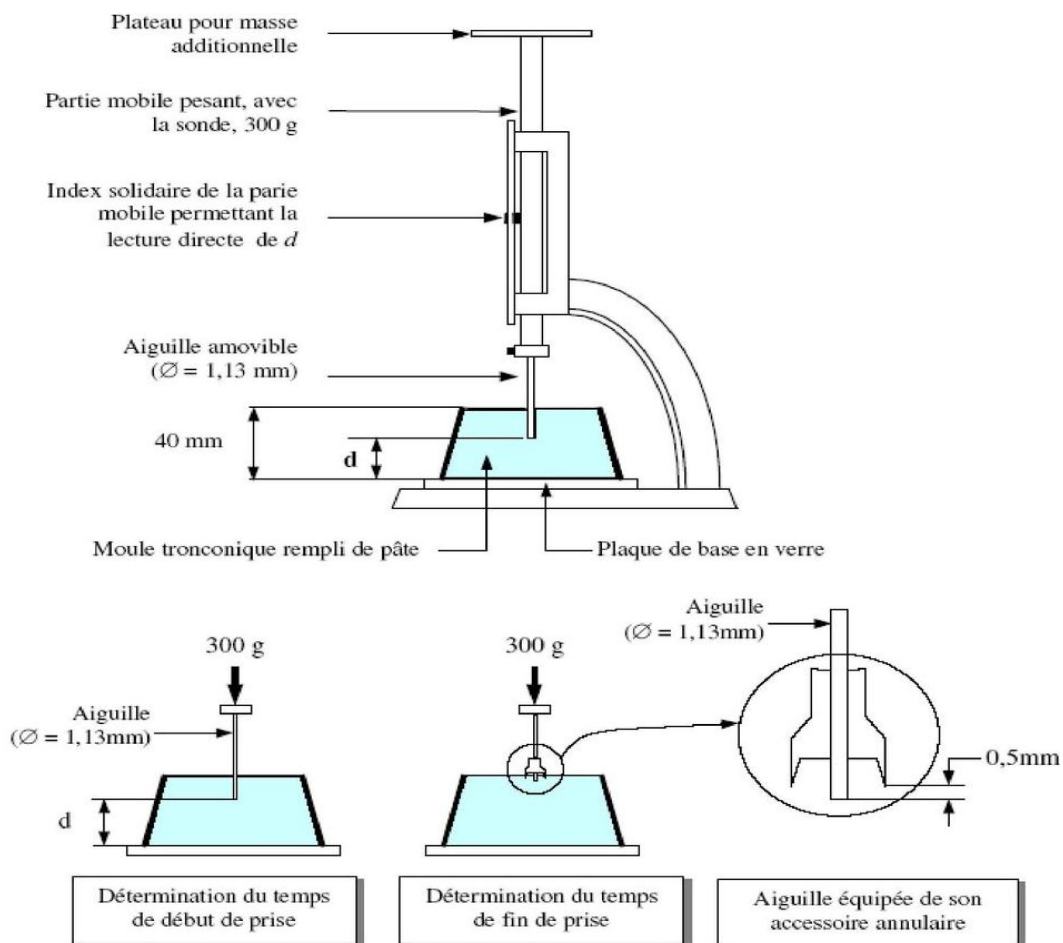


Figure II.2. Appareil de Vicat muni de l'aiguille amovible. [57]

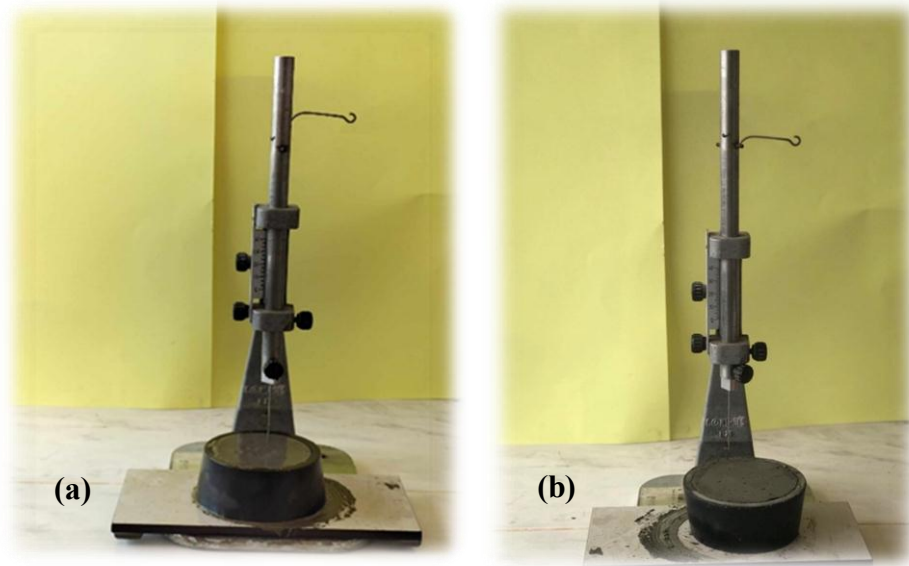


Figure II 3 : Appareil Vicat (détermination du début (a) et fin de prise (b)).

II.3. ESSAIS SUR MORTIERS

II.3.1. Essais sur mortiers à l'état frais

II.3.1.1. Formulation des mortiers

Des mélanges de mortier ont été réalisés à partir du ciment résistant aux sulfates CEM I 42,5. Les rapports eau sur ciment est constantes pour tous les mortiers préparés. Trois mélanges obtenus suite au remplacement partiel en volume du ciment par différents pourcentages de perlite et de pouzzolane ainsi que des formulations témoins pour le besoin de comparaison. Afin d'évaluer l'effet de ces ajouts sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers, des éprouvettes de dimensions $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ont été confectionnées selon les compositions données dans le Tableau II.3.

Tableau II.3 : Formulations des mortiers.

Mortiers	M0	M15	M15/5	M15/10
Ciment(g)	450	420,2	405	403,3
Eau(g)	225	210,1	202,5	201,65
Sable (g)	1350	1350	1350	1350
Perlite(g)	0	63,03	60,75	60,495
Pouzzolane(g)	0	0	20,25	40,33
Le rapport E/C	0,5	0,5	0,5	0,5
Adjuvant (g)	0	0,5	1,6	2
Volume de la pate	369	369	369	369

Avec :

M0 : mortier témoin sans ajouts.

M 15 : mortier avec 15% de perlite.

M 15/5 : mortier avec 15% de perlite et 5% de pouzzolane.

M 15/10 : mortier avec 15% de perlite et 10% de pouzzolane.

II.3.1.2. Préparation des mortiers

La préparation des mortiers ont été effectuée selon les étapes suivantes :

- a) introduire l'eau et le ciment dans le bol, en prenant soin d'éviter toute perte d'eau ou de ciment ;
- b) dès que l'eau et le ciment entre en contact, mettre immédiatement le malaxeur en marche à petite vitesse tout en lançant le chronométrage des étapes du malaxage. De plus, enregistrer le temps de démarrage à la minute près, comme étant le 'temps zéro'. Après 30 s de malaxage, introduire régulièrement tout le sable pendant les 30 s suivantes. Passer le malaxeur sur grande vitesse et continuer le malaxage pendant 30 s supplémentaires ;
- c) arrêter le malaxeur pendant 90 s. Pendant les premières 30 s, enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc ou en plastique tout le mortier adhérant aux parois et au fond du bol et le placer au milieu du bol ;
- d) reprendre le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.

Les opérations de malaxage selon la norme [la norme en 196-3], sont récapitulées dans le tableau.II.4 et la figure II.4.

Tableau II.4 : Etapes de malaxage d'un mortier normal [EN 196-1]

Opération	Introduire du l'eau	Introduiti on du		Introduction du sable		Raclage de la cuve	
Duré			30s	30s	60s		60s
Etats d	Arrêt				Vitess e	Arrêt	Vitesse rapide



Figure II 4 : Opérations de malaxage des mortiers.

II.3.1.3. Essai de maniabilité

La maniabilité des mortiers frais est déterminée conformément à la procédure de la norme NF P 18-452, en utilisant un maniabilimètre B. On mesure le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration pour atteindre un repère donné. La partie de cuve étant remplie avec du mortier, le soulèvement paroi mobile permet de déclencher la mise en vibration de l'ensemble de l'appareil.

La consistance est caractérisée par le temps que met le béton pour s'écouler sous l'effet d'une vibration. Ce temps sera d'autant plus court que le béton sera plus fluide. La maniabilité des mortiers caractérisés par un rapport E/C et un volume de pâte constant a été gardée commune aux alentours de 6±1 secondes.

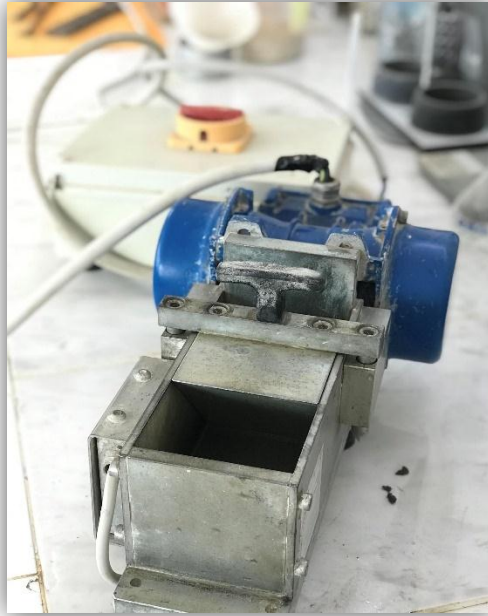


Figure II.5 : l'appareil d'essai
« MANIABILIMETRE B »

- **Equipement utilisé**

La maniabilité du mortier frais est déterminée à l'aide du maniabilimètre, L'appareil utilisé est schématisé sur la Figure II.5. Il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique (9cm×9cm×180cm), posé sur des supports en caoutchouc, Équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible.

- **Conduite de l'essai**

Le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison et mis en place par piquage en 3 couches. 4 minutes après la fin du malaxage, la cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibreur et le déclenchement d'un chronomètre par l'opérateur. Sous l'effet de la vibration, le mortier s'écoule (Figure II.6). Le chronomètre est arrêté quand le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier. Le temps t mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance.

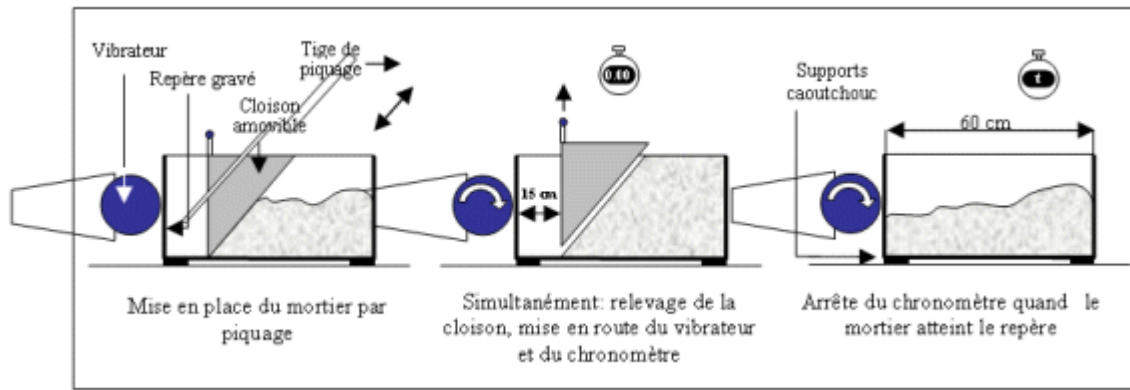


Figure II.6 : Principe de fonctionnement du Maniabilimètre à mortier. [[56]

Le temps t mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide ou plus maniable, comme illustré dans le Tableau II.5, Figure II.5.

Tableau II.5. Classe de consistance selon la durée d'écoulement [LA NORME EN 206-1].

Class de consistance	Durée en (s)
Ferme	$t \geq 40$
Plastique	$20 < t \leq 30$
Très plastique	$10 < t \leq 20$
Fluide	$t \leq 10$

II.3.1.4. Préparation des éprouvettes

- **Moulage des éprouvettes**

Les éprouvettes sont la forme prismatique de section rectangulaire (4×4×16) cm (Figure II.7).

Mouler les éprouvettes immédiatement après la préparation du mortier. Le moule et la hausse étant solidement fixés sur la table à chocs, introduire, à l'aide d'une cuiller appropriée, en une ou plusieurs fois, la première des deux couches de mortier (chacune d'environ 300 g) dans chacun des compartiments du moule, directement à partir du bol de malaxage.



Figure II.7 : Moulage des éprouvettes

Étaler la couche uniformément à l'aide d'une spatule. Ensuite, serrer la première couche de mortier par 60 chocs de l'appareil à chocs. Introduire la seconde couche de mortier, en veillant à assurer un surplus, niveler à l'aide de la spatule et serrer à nouveau par 60 chocs.

Retirer doucement le moule de la table à chocs et ôter la hausse. Enlever immédiatement l'excès de mortier. Déplacer la règle lentement, en le tirant dans un mouvement de scie transversal, une fois dans chaque sens. Refaire l'opération d'arasement en tenant la règle selon un angle plus aigu pour lisser la surface.

Enlever le résidu de mortier laissé sur le périmètre du moule par suite de l'arasement. Étiqueter ou marquer les moules pour permettre leur identification.

• **Manutention et conservation avant démoulage**

Poser sur le moule une plaque en verre, en acier ou en tout autre matériau imperméable qui ne réagit pas avec le ciment (Figure II.8).

Placer, sans délai, chaque moule couvert sur un support horizontal dans la chambre ou l'armoire humide.



Figure II.8 : Pose d'une plaque en plastique sur le moule

• **Démoulage des éprouvettes**

Effectuer le démoulage en prenant soin de ne pas détériorer les éprouvettes. Des marteaux en caoutchouc ou en plastique, ou d'autres instruments conçus dans ce but, peuvent être utilisés pour le démoulage (Figure II.9).. Après démoulage, couvrir d'un linge humide les éprouvettes choisies pour l'essai à 24 h et les conserver ainsi jusqu'au moment des essais. Marquer convenablement les éprouvettes choisies pour une maturation dans l'eau, dans un but d'identification ultérieure, par exemple, avec une encre ou un crayon résistant à l'eau.



Figure II.9 : Démoulage des éprouvettes

• **Conservation des éprouvettes dans l'eau**

Immerger les éprouvettes marquées de manière convenable horizontalement dans les bacs contenant de l'eau à $(20,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$.

Retirer de l'eau les éprouvettes destinées à être essayées à un âge particulier pas plus de 15 min avant la réalisation de l'essai. Enlever tout dépôt éventuel sur les faces d'essai. Recouvrir les éprouvettes d'un linge humide jusqu'au moment de l'essai.

II.3.2. Essais sur mortiers à l'état durci

II.3.2.1. Essais d'absorption capillaire

- **Principe**

L'absorption capillaire mesure le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes de mortier, non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique.

- **Appareillage**

- Une balance d'une précision de 0,1 g.
- Un récipient pour contenir 9 éprouvettes, avec un socle plat et un couvercle ;
- Un dispositif permettant de maintenir un niveau d'eau constant dans le récipient ;
- Le matériel nécessaire à la préparation de prismes de mortier de $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ conformes à la norme [EN 480-5].

- **Mode opératoire**

- Dans cette étude, l'essai est effectué selon la norme EN 480-5.
- Les éprouvettes de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ sont conservées dans une armoire climatisée maintenue à $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ et à $(65 \pm 5) \%$ d'humidité relative, pesées, puis placées verticalement dans un récipient rempli d'eau à niveau constant $(3 \pm 1) \text{ mm}$ au-dessus de leur base.
- Peser les éprouvettes après 7 jours, puis les placer verticalement dans un récipient rempli d'eau à niveau constant. (Figure II.10 et II.11).



Figure II 10 : Position verticale des Éprouvettes de mortiers

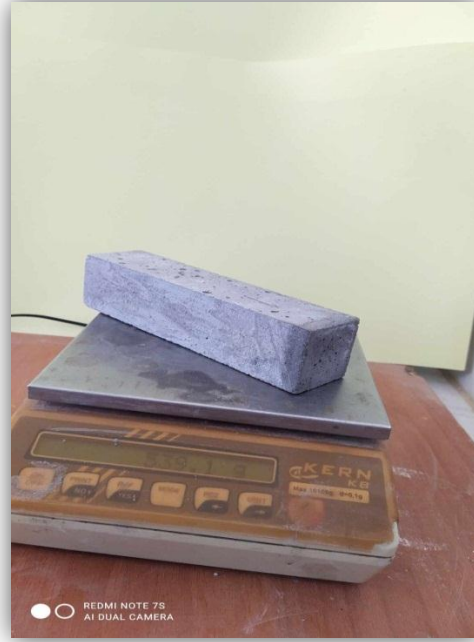


Figure II 11 : Peser des éprouvettes

- Laisser les éprouvettes reposer sur un fil de plastique pour permettre à l'eau d'accéder librement à leur base. Maintenir le niveau d'eau à (3 ± 1) mm au-dessus de leur base.
- Eviter tout contact entre les éprouvettes.
- Immédiatement après la mise en place des éprouvettes, poser le couvercle sur le récipient.
- Après 1 jour, sortir les éprouvettes du récipient, les essuyer légèrement avec un papier ou un chiffon sec afin d'éliminer l'eau excédentaire, puis les peser (M_1) et les replacer dans le récipient en position verticale. Traiter toutes les éprouvettes individuellement de la même manière.
- On refait la pesée après 7 jours pour avoir M_7 (Figure.II.11).

L'absorption capillaire (C) pour une échéance donnée est exprimée en grammes par centimètre carré, par la formule (II.1).

$$C = \frac{M_j - M_0}{16} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

M_0 : est la masse de l'éprouvette après conservation dans l'air pendant 7 jours en grammes. M_j : est la masse

II.3.2.2. Essais de résistances mécaniques

- ***Objectif de l'essai***

Il s'agit de vérifier la classe de résistance du ciment et suivre le comportement mécanique des différents mortiers.

- ***Principe de l'essai***

L'essai consiste à mesurer les résistances à la traction et à la compression d'éprouvettes de mortier normal. Dans un tel mortier la seule variable est le taux du substituant partiel au ciment.

- ***Équipement nécessaire (norme EN 196-1)***

- Un malaxeur normalisé.
- Des moules normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée 4 cm x 4 cm et de longueur 16 cm.
- Une machine d'essai de résistance à la flexion et à la compression (Figure II.12) permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150KN avec une vitesse de mise en charge de 50N/s \pm 10N/s à 2400 N/s \pm 200N/s. La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion (Figure II.12).



Figure 12 : Presse pour mortier (laboratoire LCTPE).

- *Conduite de l'essai*

La norme EN196-1 décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai. Avec le mortier normal préparé, on remplit un moule (4x4x16) cm³. Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux couches et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. Après quoi le moule est arasé ; recouvert d'un film plastique et entreposé dans la salle humide.

24h après le début de malaxage ; ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans l'eau 20°C ± 1°C jusqu'au moment de l'essai de rupture.

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur les figures II.13, II.14 et II.15.

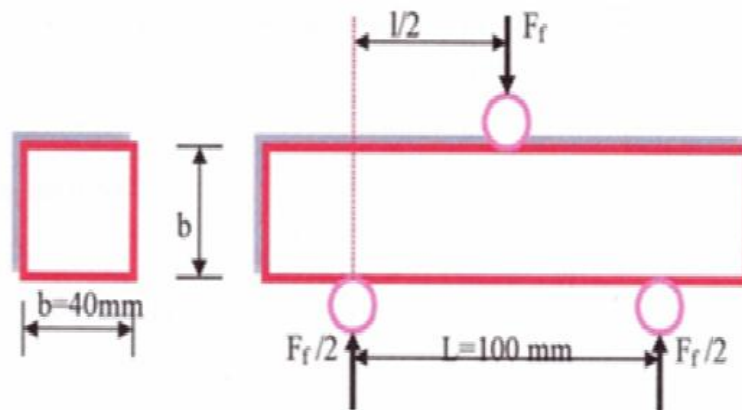


Figure II.13 : Dispositif de flexion par trois points [58]



Figure II.14. Essai de résistance à la flexion.



Figure II.15 : dispositif de flexion

Si F_f est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture par la formule (II.2) vaut :

$$\frac{F_f.l}{4} \quad (\text{II.2})$$

Et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette par la formule (II.3) est :

$$R_f = \frac{F_f.l,5}{b^3} \quad (\text{II.3})$$

Cette contrainte est appelée la résistance à la flexion. Compte tenu des dimensions b et l , Si F_f est exprimée en newtons (N). Cette résistance exprimée en méga pascals (MPa) la formule (II.4) vaut :

$$R_f = 2.34 \times 10^{-3} F_f \quad (\text{II.4})$$

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiqué sur la Figure II.16, Figure II.17 et Figure II.17. Si F_c est la charge de rupture, la contrainte de rupture par la formule (II.5).

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (\text{II.5})$$

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si F_c est exprimée en newtons, cette résistance exprimée en méga pascals par la formule (II.6) vaut :

$$R_c = \frac{F_c (N)}{1600} \quad (\text{II.6})$$

Les résultats obtenus pour chacun des 6 demi-prismes sont arrondis à 0.1 MPa près et on en fait la moyenne. Si l'un des 6 résultats diffère de $\pm 10\%$ de cette moyenne, il est écarté et la moyenne est alors calculée à partir de 5 résultats restants. Si à nouveau un des 5 résultats s'écarte de $\pm 10\%$ de cette nouvelle moyenne, la série des 6 mesures est écartée.

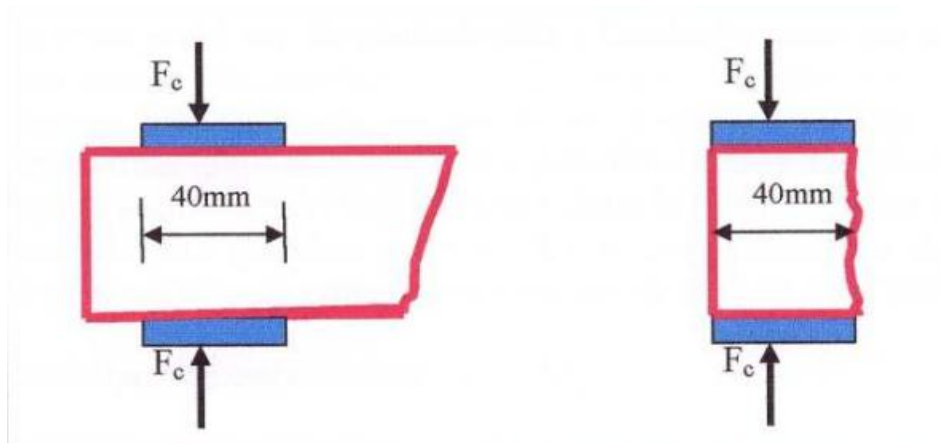


Figure II.16 : Dispositif de compression [58].



Figure II.17. Rupture de l'éprouvette en compression.



Figure II.18 : Aspect de l'éprouvette après essai de la compression

II.4. CONCLUSION

Dans le but de caractériser les différents matériaux utilisés, nous avons effectué plusieurs séries d'essais : physiques, et mécaniques, qui nous ont permis d'avoir une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux entrant dans la composition des pâtes et des mortiers étudiés, en particulier, la perlite naturelle de Maghnia et la pouzzolane de Béni-saf.

En effet, ces analyses vont nous permettre aussi de commenter les résultats des essais expérimentaux. L'objectif de ces essais est d'évaluer les effets de la perlite naturelle de Maghnia et la pouzzolane de Béni-saf sur les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux cimentaires.

PARTIE III :

RESULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE I :
RESULTATS DES ESSAIS
A L'ETAT FRAIS

CHAPITRE I : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT FRAIS**I.1. INTRODUCTION**

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats des différents essais de caractérisation à l'état frais effectués sur des pâtes et des mortiers confectionnés selon les différentes combinaisons d'ajouts de perlite et de pouzzolane comme substitution au ciment. Il s'agit des essais de consistance et de prise sur les pâtes, et des essais de maniabilité sur les mortiers.

I.2. RESULTATS DE L'ESSAI DE CONSISTANCE DES PATES DE CIMENT

Les résultats de consistance obtenus pour chaque composition de pâte de ciment sont donnés par le tableau I.1 et la figure I.1

Tableau I.1 : Résultats de consistance pour chaque composition de pâte.

Les pates	P0	P15	P15/5	P15/10
Eau (g)	121.8	125	129	133
Ciment (g)	500	425	400	375
Perlite (g)	0	75	75	75
Pouzzolane	0	0	25	50
Le rapport E/C	0,244	0,249	0,322	0,355
Le rapport E/L	0,244	0,25	0,258	0,266

Avec

P 0 : Pâte témoin à 100 % de ciment CEM I.

P15 : Pâte à 85% de ciment CEM I + 15% de perlite.

P15/5 : Pâte à 80% de ciment CEM I + 15% de perlite + 5% de pouzzolane.

P15/10 : Pâte à 75% de ciment CEM I + 15% de perlite + 10% de pouzzolane.

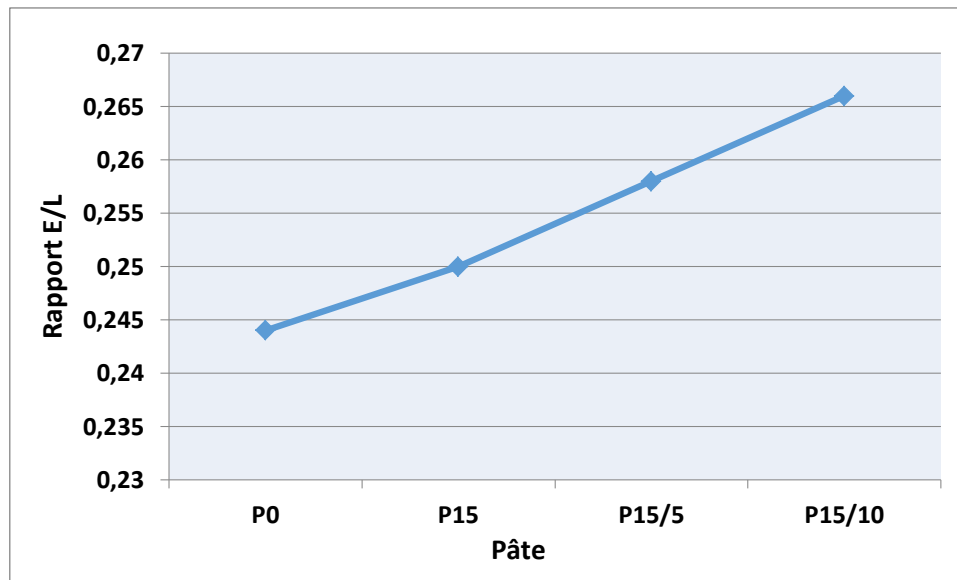


Figure I.1 : Variation des rapports E/L en fonction du dosage en perlite.

D'après la courbe de la figure I.1, on peut constater que les besoins en eau des pâtes contenant l'ajout de perlite naturelle et de pouzzolane naturelle sont supérieurs à celui du ciment sans ajout. Par conséquent, à mesure que la quantité de la perlite augmente, les besoins en eau, pour avoir une consistance normale, augmente également.

Ceci est dû probablement au fait que la poudre de perlite et de pouzzolane a une surface spécifique plus grande, et a donc besoin de plus d'eau lors de la préparation de la pâte. Plusieurs auteurs ont rapporté les mêmes constatations en utilisant la perlite naturelle ou la pouzzolane naturelle comme addition pouzzolanique pour produire des ciments mélangés (Chaib *et al.*, 2024; Belaribi, 2015; Ghrici *et al.*, 2006).

1.3. RESULTATS DE L'ESSAI DES TEMPS DE PRISE DES PATES DE CIMENT

Le tableau I.2 et la figure I.2 donnent les valeurs des temps de début de prise, de fin de prise et les temps de prise, mesurés sur des pâtes témoin et celles contenant 15 % de perlite, 15% de perlite+5% de pouzzolane et 15% de perlite+10% de pouzzolane par rapport au dosage du ciment.

Tableau I.2 : les temps de début de prise, de fin de prise et de prise et les temps de prise des différentes pâtes

Les pâtes	P0	P15	P15/5	P15/10
Début de prise (minutes)	186	168	162	160
Fin de prise (minutes)	356	326	288	277
Le temps de prise (minutes)	170	158	126	117

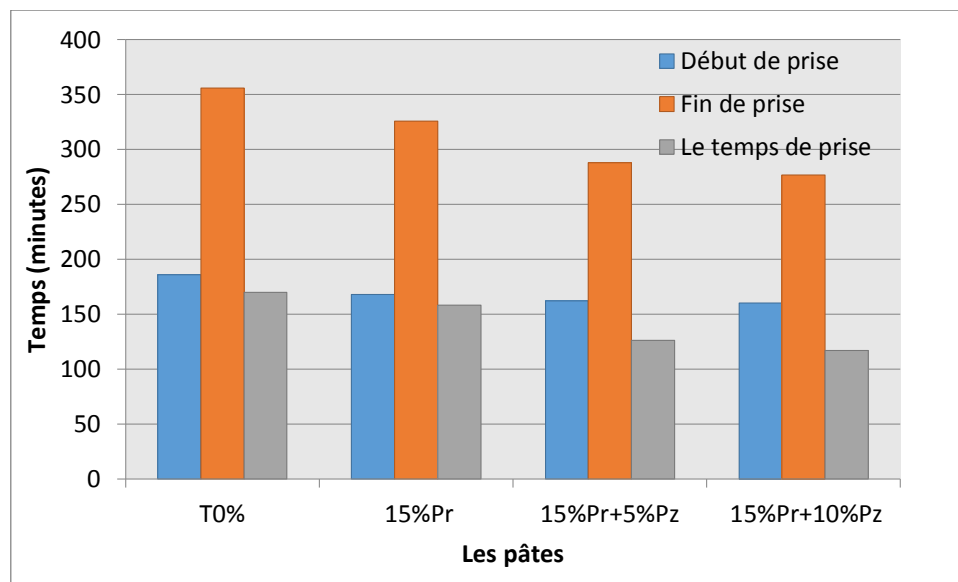


Figure I.2 : les temps de début de prise et fin de prise et de prise et les temps de prise des différentes pâtes.

D'après les résultats, les temps de prise diminuent inversement à l'augmentation du pourcentage de l'ajout pouzzolanique, il apparait que l'ajout de la perlite affecte légèrement les temps de prise puisqu'un écart de 12 minutes est enregistré soit 8% pour la pâte (P15) par rapport à celui de la pâte témoin, Par contre l'ajout de la pouzzolane naturelle affecte sensiblement les temps de prise car un écart de 44 et 53 minutes est enregistré soit 25% et 31% respectivement pour les pâte (P15/5) et (P15/10) par rapport à celui de la pâte témoin, cela peut être expliquer aussi par le fait que la finesse du mélange attribuée plus à la perlite ($4230 \text{ cm}^2/\text{g}$) et la pouzzolane ($4453 \text{ cm}^2/\text{g}$) que le ciment ($2869 \text{ cm}^2/\text{g}$) permet d'avoir une large surface de contact avec l'eau, la cinétique d'hydratation est accélérée, il y'a donc une précipitation et germination rapide des cristaux de C-S-H responsables du durcissement qui finalement, vont causer à leur tour une diminution du temps de prise [MOSTEFA F].

I.4. MANIABILITE DES MORTIERS

La comparaison entre différentes formulations nécessite une même maniabilité. Les temps d'écoulement des mortiers contenant les ajouts pouzzolaniques (perlite naturelle et pouzzolane naturelle) doivent être proches de celui du mortier témoin.

Le rapport E/C est fixé, égal à 0,5. Comme référence, la maniabilité obtenue, mesurée à l'aide d'un Maniabilité sur un mortier témoin est d'environ 6 secondes \pm 1secondes selon la norme [NF P 18-452].

Le tableau I.3 et la figure I.3 fournissent les détails des mélanges de mortier obtenus.

Tableau I.3 : la maniabilité des mortiers (temps d'écoulement en seconde)

Mortiers	E/C	Adjuvant (g)	Temps d'écoulement (seconds)
Témoin (M0)	0,5	0	6,1
15% perlite (M15)	0,5	0.5	6,6
15%perlite+5%pouzzolane (M15/5)	0,5	1.6	7
15%perlite+10%pouzzolane (M15/10)	0,5	2	7,06

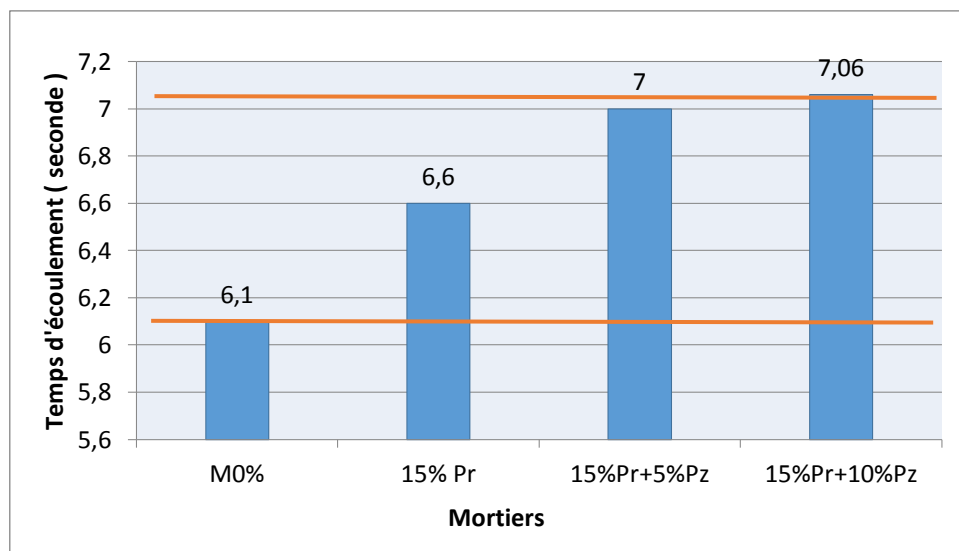


Figure I.3 : Temps d'écoulement en fonction du dosage en perlite et pouzzolane.

D'après les résultats de la figure I.3 on observe que les temps d'écoulements des mélanges avec perlite sont légèrement inférieurs à celui du mortier témoin mais les temps satisfont les conditions.

Pour garder une maniabilité plus ou moins constante, on augmente la quantité d'adjuvant

nécessaire pour l'obtention d'un mélange maniable et ouvrable (**Chihaoui, 2018; Hamadache, 2018**). Plusieurs chercheurs, (**Guenanou, 2018; Senhadji, 2013**), ont également prouvées que le mortier avec du ciment Portland sans ajout présente une maniabilité supérieure aux mortiers pouzzolaniques. Ainsi, la maniabilité des mortiers pouzzolaniques diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la perlite. Ce qui prouve que l'augmentation du taux de la perlite accroît sensiblement la demande en eau (**Chaib *et al.*, 2024; Hamadache, 2018**).

I.5. CONCLUSION

La caractérisation des pâtes et mortiers à l'état frais ont été présentés dans ce chapitre. L'essai de consistance sur les pâtes à montrer que la présence de la perlite et notamment la pouzzolane exige une augmentation du besoin de la quantité d'eau, d'autre part, elle contribue également à accélérer le temps de prise.

Enfin, l'ajout d'adjuvant a été nécessaire pour avoir une maniabilité équivalente pour toutes les formulations témoin et à base des ajouts pouzzolanique (perlite et pouzzolane).

CHAPITRE II :
RESULTATS DES ESSAIS
A L'ETAT DURCI

CHAPITRE II : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT DURCI**II.1. INTRODUCTION**

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats des mortiers à différents pourcentages de perlite et de pouzzolane naturelle 15% perlite, 15%perlite+5%pouzzolane et 15%perlite+10%pouzzolane et un mortier témoin, afin de caractériser leur capacité en absorption d'eau par un essai dit absorption capillaire, mesurée à des échéances de 1 jour et 7 jours. Aussi les essais relatifs à l'étude du comportement mécanique des différents mortiers (résistances à la compression et à la traction par flexion) ont été menés à des échéances de (3, 7, 14, 28 ,60 et 90 jours).

II.2. RESISTANCE A LA TRACTION

Les résultats de la résistance à la flexion sont regroupés dans le tableau II.1. La figure II.2 montre le développement de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant différents pourcentages d'ajouts et celles du mortier témoin. Nous remarquons que les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute de résistance.

Tableau II.1 : Résistance à la flexion en fonction de l'âge des différents mortiers (MPa).

	Temps (jours)					
	3	7	14	28	60	90
Témoin	5,63	6,82	8,19	9,12	9,25	9,61
15% Pr	5,64	6,74	8,28	8,98	9,10	9,80
15%Pr+5%Pz	5,38	6,50	8,27	9,16	9,53	9,82
15%Pr+10%Pz	5,29	6,59	8,49	8,38	8,70	9,16

La figure II.2 présente l'effet du taux de substitution de la perlite et de la pouzzolane sur le pourcentage de la résistance à la flexion des mortiers aux différentes échéances.

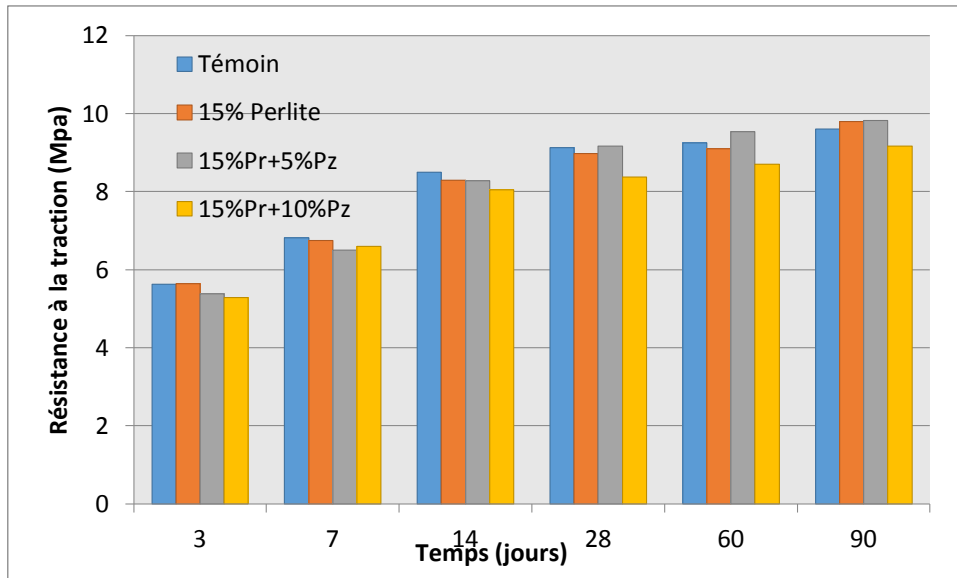


Figure II.1 : Evolution des résistances à la traction en fonction du temps.

- A l'Age de 3, 7, et 14 jours la résistance des mortiers incorporant la perlite et la pouzzolane sont inférieurs à celle du mortier témoin. En effet à 14 jours le mortier témoin présente une valeur maximale de 8.5 MPa, suivie de mortier (M15) et celui du mortier (M15/5).

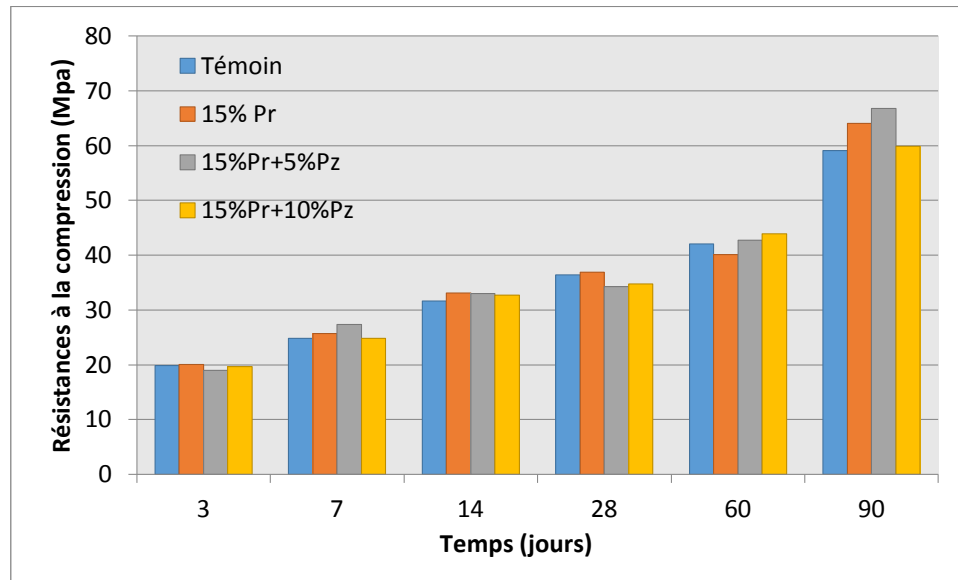
- À long terme (90jours) Les mortiers (M15/5) et (M15), développent des résistances supérieures à celles du mortier témoin (M0) à long terme. Ceci peut être attribué à l'activité pouzzolanique qui est lente au jeune âge et se développe à long terme. La valeur de la résistance du mortier (M15/5) est la plus élevée puisque une valeur de 9.82 est enregistrée à 90 jours.

II.3. RESISTANCE A LA COMPRESSION

Les résultats de la résistance à la compression sont regroupés dans le tableau II.2. La figure II.2 montre le développement de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant différents pourcentages d'ajouts. Nous remarquons que les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute de résistance.

Tableau II.2 : Résistance à la compression en fonction de l'âge des différents mortiers (MPa)

	Temps (jours)					
	3	7	14	28	60	90
Témoïn (M0)	19,89	24,85	31,66	36,40	42,02	59,11
15% Pr (M15)	20,08	25,69	33,13	36,93	40,15	64,04
15%Pr+5%Pz (M15/5)	18,97	27,37	33,02	34,24	42,71	66,83
15%Pr+10%Pz (M15/10)	19,69	24,85	32,71	34,77	43,90	59,92

**Figure II.2 :** Evolution des résistances à la compression en fonction du temps.

Les mortiers élaborés avec des ajouts pouzzolaniques développent des résistances comparables et même légèrement supérieures à celles du mortier témoïn à court et moyen terme (3 à 60 jours) Ceci est attribué probablement à l'activité pouzzolanique de l'ajout de perlite et de la pouzzolane qui est lente au jeune âge.

Au-delà de cette échéance (90 jours), les mortiers à base des ajouts pouzzolaniques commencent à se distinguer du mortier témoïn par leurs performances mécaniques notamment le mortier (M15/5). Cette augmentation peut être attribuée aux rôles complémentaires de l'effet filler et l'effet pouzzolanique de la perlite au sein de la matrice cimentaire. L'effet filler réduit la porosité de la zone de transition pâte-granulat et l'effet pouzzolanique contribue à la formation de gels de C-S-H issus de la réaction pouzzolanique qui se déclenche tardivement entre la silice présente dans la perlite et la portlandite générée par l'hydratation du ciment, d'où une structure plus dense, plus compacte et par conséquent une pâte plus résistance.

Ce résultat a été également observé par de nombreux chercheurs : [Yu L. H. et al., 2003][Meral Ç., 2004][Erdem T. K. et al., 2007][Guenanou F., 2014][Chihaoui R., 2018].

II.4. RESULTATS DE L'ESSAI D'ABSORPTION CAPILLAIRE

Les résultats obtenus à chaque échéance sont exprimés sous forme de la moyenne des trois valeurs mesurées des éprouvettes 4x4x16 cm³ mises en contact avec l'eau durant sept jours. Le tableau II.3 et la figure II.3 représentent les résultats obtenus de l'essai d'absorption capillaire des mortiers à base des ajouts pouzzolaniques et un mortier témoin. On utilise la formule (II.1) pour calculer le coefficient d'absorption capillaire.

$$C = \frac{M_0 - M_j}{16} \tag{II.1}$$

Avec :

C : coefficient d'absorption capillaire (g/cm²)

M₀ : est la masse de l'éprouvette après conservation dans l'air pendant 7 jours en grammes.

M_j : est la masse de l'éprouvette après le temps requis d'absorption, en grammes.

Tableau II.3 : Coefficients d'absorption capillaire des différents mortiers

Les différents mortiers	Absorption capillaire (g/cm ²)	
	1 Jours	7 Jours
Témoin (M0)	0,97	1,65
15% Pr (M15)	0,95	1,49
15% Pr+5%Pz (M15/5)	0,76	1,30
15%Pr+10%Pz (M15/10)	0,69	1,35

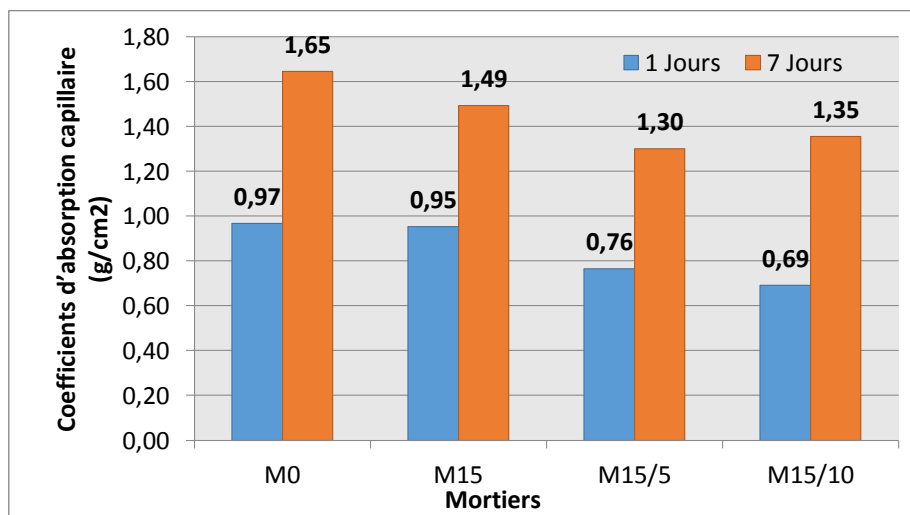


Figure II.3. Evolution des coefficients d'absorption capillaire des différents mortiers.

D'après la figure II.1 on remarque que l'absorption d'eau du mortier témoin est plus élevée que celles des mortiers à base de perlite et de pouzzolane et ce pour les deux échéances. L'accroissement de l'absorption d'eau relative à chaque mortier est observé entre le premier et le septième jour. On distingue qu'avec l'augmentation du pourcentage de l'ajout de perlite et la pouzzolane, le coefficient de l'absorption capillaire diminue ce qui rend l'effet de la substitution plus avantageuse et notamment le dosage de 15% Perlite+5%Pouzzolane (M15/5).

Ainsi, on peut dire que l'ajout de la perlite et la pouzzolane ont contribuées à sceller les capillaires résultant de l'interaction du ciment, de l'eau et du sable. Ces résultats sont en accord avec les résultats d'Ayed et all [Ayed *et al.*, 2022], Bourroubey [Bourroubey] , Maamar Benhadjar [Maamar Benhadjar et al], et Bouzidi, C [Bouzidi, C].

II.5. CONCLUSION

Ce chapitre avait pour objectif de comparer les propriétés physico-mécaniques à l'état durci des mortiers à base de différents pourcentages d'ajouts. L'incorporation des ajouts minéraux (Perlite et Pouzzolane) au CEMI, contribue d'une façon très positive sur les performances mécaniques des mortiers binaires confectionnés.

Le taux de substitution (M15) et (M15/5) donne les meilleures résistances à la compression et à la flexion des mortiers et qui dépassent celles du mortier de contrôle, à moyen et long terme.

Suite aux résultats des essais d'absorption capillaire, une diminution de l'absorption de l'eau avec l'augmentation des ajouts pouzzolaniques (perlite + pouzzolane) ont été notées, le mortier témoin absorbe plus que les mortiers (M15/5) et (M15/10), la perlite et la pouzzolane contribuent donc à diminuer les pores dans la matrice cimentaire.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de ce travail est de prouver qu'il est possible de remplacer partiellement le ciment par l'ajout de la perlite de Maghnia et la pouzzolane de Béni-Saf, des produits naturels, qui ne nécessite pas d'être traitées par des procédés industriels coûteux. Leurs prix sont bien inférieurs à celui du ciment, qui passe par des processus très onéreux. Cependant, le mortier binaire composé de ciment et de perlite, ainsi les mortiers ternaires contenant la perlite et la pouzzolane, ne peuvent être adoptés que s'ils présentent des performances physico-mécaniques nettement supérieures à celles obtenues en utilisant uniquement du ciment.

A l'issue des résultats obtenus nous sommes parvenues aux conclusions suivantes :

- L'essai de consistance sur les pâtes à montrer que la présence de la perlite et notamment la pouzzolane exige une augmentation du besoin de la quantité d'eau, d'autre part, elle contribue également à accélérer le temps de prise.
- La maniabilité des mortiers diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la perlite et la pouzzolane. De plus, il est nécessaire d'augmenter la quantité d'adjuvant nécessaire pour obtenir des mélanges maniables et ouvrables, avec une maniabilité plus ou moins constante et équivalente à celle du mortier témoin;
- L'augmentation du dosage en ajouts pouzzolaniques contribue à la diminution de l'absorption capillaire. Le taux de 15 % perlite+5% pouzzolane (M15/5) de substitution reste le plus intéressant et avantageux, en conséquence, il offre la possibilité d'améliorer la durabilité des mortiers. Ainsi, on peut affirmer que la combinaison perlite et pouzzolane a aidé à sceller les capillaires en interagissant avec le ciment, l'eau et le sable.
- Le comportement mécanique du mortier contenant 15 % perlite+5% pouzzolane (M15/5) de substitution est le plus marquant car des résistances élevées ont été notées, avec une évolution importante à 90 jours par rapport au mortier témoin. Ce qui explique que l'ajout de la perlite et la pouzzolane naturelle dans le ciment améliore à long terme la résistance mécanique du mortier grâce au déclenchement tardif de la réaction pouzzolanique.

PERSPECTIVES

En perspective de ce travail, il pourrait être intéressant de compléter l'étude des mortiers en traitant plusieurs cas de mélanges avec d'autres types d'ajouts minéraux disponibles en Algérie, ainsi une étude plus approfondie des caractéristiques de durabilité des mortiers à base de différents pourcentages d'ajouts pouzzolaniques peut être envisageable dans la mesure où des comportements vis-à-vis de la carbonatation ou les attaques acides et sulfates nécessitent un suivi permanent de la composition minéralogique avant et après la conservation dans les milieux agressifs.

Enfin, l'Algérie compte beaucoup de matériaux naturels non explorés qui peuvent être utilisés comme ajouts cimentaires pour l'élaboration de nouveaux ciments. Cela va permettre de diversifier l'utilisation de nos ressources naturelles.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : Présentation groupe CICA « groupe industrielle des ciments d'Algérie.
- [2] : **Michel.A** « *guide pratique pour l'emploi des ciments* » dépôt N° d'Editeur : 3759. Avril 1982.
- [3] : Ciments Calcia. HEIDELBERGCEMENT GROUP .<https://www.cimentscalcia.fr/fr/implantations-contacts/fabrication-ciment#>
- [4] : **Aiche. Omar, Chouiref.A Hadi et kadi.A** mémoire « *la caractérisation du ciment pétrolier local* » université kasdi merbah Ouargla.2021/2022.
- [5] : **Abed.S** mémoire de master « *influence des taux élevés des fines calcaires sur le comportement mécanique et rhéologique des mortiers à base du sable de carrière.* ».Université Mohamed khider de Biskra. 2017/2018.
- [6] : Hydratation du ciment portland et structure de pate hydratée. MICHEL PIGEON,
- [7] : procédés de traitement et de valorisation-les ciments portland. Ressources.unit.eu /cours/RDM/RDM6/co/grain3_1.html.
- [8] :**Komar.A.**Eddition mir moscou « matériaux et éléments de construction éditions mir, 2, pervi Rijski péréoulok , Moscou, I-110, GSP, U.R.S.S ».
- [9] : <https://datis-inc.com/blog/clinker-calcination/>. info@Datis-inc.com
- [10] : ciment portland juillet 30,2021.traitement BECOSAN.
- [11] : Afnor Editions [Norme NF 15-301].
- [12] :**Tebina.N.** Mémoire de master « *impact finesse de ciment sur le temps de priseet le durissement du mortier* ». Université de Biskra .2021/2022
- [13] :Infociment.fr
- [14] :**Chouikhi.F** « *Etude physicochimique du ciment* » .université de Jijel Algérie.2007
- [15] : **Tayeb Hammani.K et al bouahia.CH** « *Influence des effets température et de conservation sur la résistance mécanique du béton* » université Ahmed draia Adrar. 2017.2018
- [16] : doc.lerm.fr/lhydratation_ du_ ciment _portland/25 juin 2009.
- [17] :**Maamar benhadjar.L et al Chenine.S** « *Influence de la perlite naturelle sur les résistances mécaniques des mortiers* » .université abd elhamid ibn badis mostaganem. .2019/2020.
- [18] : Réf : C920 v2 caractéristiques et emploi des ciments
- [19] : **Ben aouira.H et al Bouhali.N** « *étude de l'influence des ajouts pouzzolaniques sur l'évolution du propriété d'une matrice cimentaire* »Université mohamed boudiaf m'sila.2016/2017.

- [20] : **P. Jacobs** « *La Contribution De L'industrie Cimentière A La Réduction Des Emissions De Co2, 1050* » Bruxelles. Comité De Coordination De La Politique Internationale De L'environnement www. Climat. Be – Chiffres.2005
- [21] :**Derbla.R** thèse doctorat « *influence des additions minérales sur le comportement au jeune Age et long terme des béton autoplaçants traités thermiquement* ».2 novembre 2015.
- [22] : **Errouzi.I et Boualla ;Soufari.A** mémoire « *étude de l'influence de l'ajout de la pouzzolane sur les caractéristiques physicochimiques des ciments.*
- [23] : les additions minérales. <https://fr.scribd.com/document/624203507/2022-Chapitre-3-Additions-Minerales>
- [24] : infociments.fr/béton/les-additions-minérales-pour-béton
- [25] : **Errouzi.I et Boualla ;Soufari.A** mémoire « *étude de l'influence de l'ajout de la pouzzolane sur les caractéristiques physicochimiques des ciments.*2011.
- [26] :**Soufari.A.** « *etude de l'influence de l'ajouts de la pouzzolane sur les caractéristiques physico-chimiques des ciments* ».2011.
- [27] :**NAGOUDI.**2014 « *Caractéristiques physico-mécaniques des mortiers contenant différents ajouts minéraux* », *exemple de la perlite. Mémoire de magistère, Université de sciences et de la technologie d'Oran MB, Algérie.*
- [28] :**Benilles.M** « *etude du composite cimentaire à l'état frais et durci* » université yahia fares de media ».2018
- [29] : <https://www.cultureindoor.com/fr/content/84-perlite-conseils-dutilisation>
- [30] :**Noumia.A et Niati.S** mémoire 2021/2022] « *valorisation de la perlite naturelle de maghnia dans les mortiers (15%_25%)* ».2022
- [31] : **LSUNMA** (1999). Livret des substances utiles non métalliques de la Wilaya de Tlemcen. Edition du service géologique d'Algérie
- [32] :**Guenanou F.**, « *Durabilité des mortiers contenant la perlite vis-à-vis de la corrosion des armatures* », Thèse de Doctorat en Sciences, 2018.
- [33] : **Hamadache M.** « *Résistances mécaniques, conductivités résistance à la 75 corrosion des mortiers pouzzolaniques* »,diplome de doctorat en sciences ,ENP Oran , (2018).
- [34] :**Sunma.L.**1999. Livret des substances utiles non métalliques de la Wilaya de Tlemcen.Edition du service géologique d'Algérie.
- [35] :**Hamadache, M.** « *Résistances mécaniques, conductivité et résistance à la corrosion des mortiers Pouzzolaniques* », Thèse doctorat en science, Ecole Nationale Polytechnique Mauris Audin, Oran, Algérie.2018.
- [36] : « *perlite : propriété, formation, utilisations* », gisements.<https://fr.geologyscience.com/minéraux/silicates-minéraux/perlite>.
- [37] : la propriété de la matier.alloprof.qc.ca

- [38]: **Herskovitch D., Lin I.J. (1996).** Upgrading of raw perlite by a dry magnetic technique. *Magnetic and Electrical Separation, OPA, Vol.7, p. 145-161.*
- [39]: **Maxim L.D., Niebo R., McConnell E.E. (2014)** Perlite toxicology and epidemiology – a review. *Inhalation Toxicology, Vol. 26 (5), p. 259-270.*
- [40] : **Amouri.A** « *comportement des mortiers à base de pouzzolane et sédiments fluviaux vis-à-vis aux attaques chimiques* ».2020.
- [41] : **Geoffray J.M., Valladeau R. (1977).** Morphologie et couleur des pouzzolanes. *Bulletin de liaison des LPC, N° 92, p.91-94.*
- [42]: **Hewlett P.** “*Lea’s Chemistry of Cement and Concrete*”. 4th Edition, *Butterworth Heinemann.*
- [43] : **Belbachir. N** « *Etude des propriétés mécaniques à court terme de béton à base de ciment pouzzolanique de synthèse* », mémoire de magister 2012.
- [44] : **Belaribi.O.,Safer.O., Belas. N., Belguesmia K. Hadj Sadok R.** « *Influence de la perlite sur le comportement mécanique, l’absorption capillaire et la conductivité thermique des mortiers* » *The Journal of Engineering and Exact Sciences – jCEC, Vol. 10 N. 03 (2024)*
- [45] **Ferk A., Leonhardt R., Denton J., Tuffen H., Hess K.U., Dingwell D.B.** :« *Paleointensity on volcanic glass of varying hydration states*» (2012)
- [46] : **Chihaoui.R.** « *Etude de durabilité des matériaux cimentaire exposés aux attaque* », *USTOMB, 2018.*
- [47] : **Bourroubey C.** « *influence de la perlite naturelle sur les resistances mecaniques des mortiers*” : université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem-Faculté des Sciences et de la Technologie, 2019.
- [48] **Senhadji, Y.** « *L’influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfates)* », Thèse de doctorat, Université de sciences et de la technologie d’Oran MB, Algérie.2013
- [49]: **Chaib, O.; Safer, O.; Dif, F.** Mechanical Behavior and Durability of Perlite Based Mortar Exposed to Sodium Sulfate Attack, *Materials Science (MEDŽIAGOTYRA).*2024
- [50]: **Erdem T. K., Meral Ç., Tokyay M., Erdogan T. Y,** "Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements", *Cement and Concrete Composites* 29: 13–21.2007.
- [51]: **Aichouba.A.** « *Effet de la pouzzolane naturelle de Béni-saf sur les propriétés d’un ciment à base de calcaire* », Colloque Méditerranéen sur les Matériaux CMEDIMAT, 6-7 décembre, Oran, Algérie 2005.
- [52]: **Ghrici, M.** Etude des propriétés physico Mécaniques et de la durabilité des ciments à base de pouzzolane naturelle, *Thèse de doctorat, Université de sciences et de la technologie d’Oran MB, Algérie.*2006
- [53] **Belaribi O.** (2015). Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzolane. Université de Mostaganem, Algérie.

[54] : Yu L. H., Ou H., Lee L. L., 2003, «*Investigation on Pozzolanic Effect of Perlite Powder in Concrete*», Cement and Concrete Research.

[55] : A Kerbouche, M. Mouli, L. Laoufi, Y. Senhadji, S. Benosmane. « Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers » 1st International Conference on sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) – October 12-14, 2009

[56] Bouzidi C .Boutadjine Z « Etude du comportement physico-mécanique des mortiers à base de 10 et 20% de perlite naturelle de Maghnia » mémoire de fin d'études de master académique, 2022.

[57] : Le ciment .<https://docplayer.fr/18048927-Le-ciment-volume-d-un-liquide-dont-la-masse-volumique-r-t-est-5connue-la-masse-c.html>.

[58] Kazi.A et Benslafa.F, Semicha.A« *Influence des additions' minérales sur la résistance mécanique des mortiers* » Afrique SCIENCE 07(2) (2011) 16 – 26.

[59] : Ayed, K., Midoune, N., Mechebek, S. *Formulation d'un mortier à base de perlite avec étude thermique et Acoustique*. Communication Science et Technologie, 11, 01, 34–46, enpo–maurice audin asjp/essn.2022.

[60]:Maamar benhadjar L., Chenine S.," *influence de la perlite naturelle sur les resistences mecaniques des mortier*",Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem - Faculté des Sciences et de la Technologie. 2020

Annexe



NOTICE PRODUIT

Sika® Plastiment® BV-40

Plastifiant/Réducteur d'eau pour hautes résistances mécaniques

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Sika® Plastiment® BV-40 est un plastifiant réducteur d'eau énergétique qui :

- augmente la compacité du béton, entraînant ainsi une amélioration des résistances mécaniques et de l'imperméabilité
- facilite la mise en place du béton
- permet éventuellement de réduire le dosage en ciment
- permet d'obtenir un retard de début de prise plus ou moins important en augmentant le dosage normal d'utilisation de béton à performances élevées, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci

DOMAINES D'APPLICATION

Augmentation des résistances mécaniques

Sika® Plastiment® BV-40 permet de réduire l'eau de gâchage d'environ 10 % sans diminuer la maniabilité du témoin. Des essais sont indispensables pour déterminer la quantité d'eau de gâchage nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée. La compacité et l'imperméabilité sont améliorées. Les résistances mécaniques à long terme sont augmentées en moyenne de 15 à 40 %.

Sika® Plastiment® BV-40 est donc particulièrement indiqué pour :

- les bétons armés à hautes performances
- les bétons précontraints
- les bétons préfabriqués étuvés

Réduction du dosage en ciment

Sika® Plastiment® BV-40 permet de réduire le dosage en ciment de l'ordre de 10% en conservant les résistances mécaniques. Il est utilisé dans ce cas en B.P.E. pour la confection de béton à la résistance.

Amélioration de la maniabilité

Sika® Plastiment® BV-40 permet d'améliorer la maniabilité à teneur en eau constante, tout en apportant une augmentation des résistances à long terme de 10% environ. Il est donc utilisé pour la confection de pièces élancées, fortement ferraillées et dans le cas de

bétons pompés.

Augmentation du délai de mise en oeuvre

A dosage élevé, le Sika® Plastiment® BV-40 augmente le temps de prise du béton. La température jouant un rôle important, il est bon de procéder à des essais. A titre indicatif :

- à 20°C, on obtient un retard de prise de 3 à 4 heures environ avec 0,6 %
- à 5°C, le même dosage provoque un retard de prise de l'ordre de 8 h

Sika® Plastiment® BV-40 est compatible avec nos entraîneurs d'air Sika® Aer et Sika® Aer-5. Cette combinaison conduit à :

- l'amélioration des résistances aux cycles gel-dégel
- la possibilité de coulage en continu (béton extrudé, béton routier)
- l'amélioration des résistances de tous bétons situés dans les zones de marnage

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

Sika® Plastiment® BV-40, grâce à ses propriétés physico-chimiques permet :

Sur béton frais :

- d'augmenter considérablement la maniabilité même en réduisant l'eau de gâchage
- de disperser le ciment dans la masse
- d'améliorer l'adhérence béton-armatures
- de s'opposer à la ségrégation
- d'améliorer la thixotropie
- d'étaler éventuellement la prise

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques,
- d'accroître la compacité
- d'augmenter l'imperméabilité
- de diminuer le retrait et le fluage

Sika® Plastiment® BV-40 est compatible avec tous les ciments et en particulier le ciment fondu.

AGRÈMENTS / NORMES

- Caractéristiques sur béton frais, résistances méca-

- niques à 7 et 28 jours, perméabilité, capillarité : CE-MEREX - PV n° 363. 1.014 du 11.02.72.
- Résistances mécaniques à 7, 28, 90 et 365 jours : EM-PA ZURICH - PV n° 59239/32 du 10.02.69
- Conformité à la norme ASTM C 494 type A : TESWELL Laboratoires (USA) - PV n° IZ-15 du 23.08.79

DESCRIPTION DU PRODUIT

Base chimique	Solution aqueuse de lignosulfonates modifiés
Conditionnement	Fût de 250 kg Cubi de 1100 kg
Durée de Conservation	Dans son emballage d'origine intact, le produit se conserve 3 ans
Conditions de Stockage	Sika® Plastiment® BV-40 gèle à - 5°C environ. En cas de gel prolongé et intense, vérifier s'il n'a pas été déstabilisé.
Aspect / Couleur	Brun foncé
Densité	1,180 ± 0,025
Extrait Sec	36,6 à 40,4 %
Valeur pH	4,5 ± 1
Teneur Totale en Ions Chlorure	< 0,1 %
Équivalent Oxyde de Sodium	≤ 2,0 %

INFORMATIONS TECHNIQUES

Instructions pour le Bétonnage Introduire le Sika® Plastiment® BV-40 dans l'eau de gâchage.

RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

Dosage	<p>Le dosage précis du Sika® Plastiment® BV-40 est fonction des conditions de chantier et de l'effet recherché.</p> <p>Plage d'utilisation recommandée : 0,3 à 1% du poids du ciment (soit 0,25 à 0,85 litre pour 100 kg de ciment).</p> <p>Comme retardateur: A partir de 0,5% du poids du ciment (soit 0,42 litre pour 100 kg de ciment).</p> <p>Son dosage exact se détermine sur chantier en procédant à quelques essais puisqu'il est fonction de la nature des composants du béton, des qualités recherchées (compacité, plasticité) et des conditions climatiques.</p> <p>Ne pas dépasser 1% (0,85 litre pour 100 kg de ciment) sans essai préalable : possibilité de retard de prise important.</p>
Distribution	Introduire le Sika® Plastiment® BV-40 dans l'eau de gâchage.

VALEURS DE BASE

Toutes les valeurs indiquées dans cette Notice Produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

ÉCOLOGIE, SANTÉ ET SÉCURITÉ

Pour obtenir des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination en toute sécurité des produits chimiques, les utilisateurs doivent consulter la fiche de données de sécurité (FDS) la plus

récente contenant les données physiques, écologiques, toxicologiques et autres données relatives à la sécurité.

RESTRICTIONS LOCALES

Veillez noter que du fait de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veuillez consulter la Notice Produit locale pour les données exactes sur le produit.

INFORMATIONS LÉGALES

Notice produit
Sika® Plastiment® BV-40
Juillet 2023, Version 01.03
021302011000000717