



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم
University Abdelhamid Ibn Badis - Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم الهندسة المدنية والمعمارية
Civil engineering & architecture department



N° d'ordre : M/GCP/2020

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie civil.

Spécialité : Structure.

Thème

**INFLUENCE DE LA PERLITE NATURELLE SUR
LES RESISTANCES MECANIQUES DES
MORTIERS**

Présenté par :

- Maamar benhadjar Louiza
- Chenine Souhila

Jury composé de :

Président : Mr BELHOUARI Fethi

Examinatrice: Mme BELAS NADIA

Encadrant : Mr BELARBI Omar

Année Universitaire : 2019 / 2020

SOMMAIRE

Résumé

Introduction général.....2

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR LE CIMENT PORTLAND

1.1.INTRODUCTION.....	6
1.2. HISTORIQUE.....	6
1.3. LIANT HYDROLIQUE : CIMENT	6
1.4. LES ETAPES DE FABRICATION DU CIMENT.....	7
1.4.1. Préparation de la matière première.....	7
1.4.2. Préparation du cru	7
1.4.3. Le séchage et le broyage	8
1.4.4. La cuisson ou calcination.....	8
1.4.5. Le broyage du ciment.....	8
1.5. LES CONSTITUANTS DU CIMENT.....	9
1.5.1. Le clinker	9
1.5.2. Le gypse (CaSO ₄).....	11
1.5.3. Les ajouts minéraux	11
1.6. HYDRATATION DE CIMENT PORTLAND	11
1.7. CINETIQUE ET CHALEUR D'HYDRATATION.....	12
1.8. PROPRIETES TECHNIQUES DU CIMENT PORTLAND.....	13
1.9. CONCLUSION.....	14

CHAPITRE 2 : LES AJOUTS CIMENTAIRES

2.1. INTRODUCTION.....	16
2.2. LES AJOUTS CIMENTAIRES.....	16
2.3. L'INTERET DE L'ETULITATION DES AJOUTS MINERAUX DANS LE GENIE CIVIL.....	16

2.3.1. Intérêt du point de vue technique.....	17
2.3.2. Intérêt du point de vue économique.....	17
2.3.3. Intérêt du point de vue environnemental.....	17
2.4. LES INCONVENIENTS D'UTILISATION DES AJOUTS MINERAUX.....	17
2.5. EFFETS DES AJOUTS SUR LES PROPRIETES DES BETONS.....	17
2.5.1. Amélioration de l'ouvrabilité.....	17
2.5.2. Chaleur d'hydratation.....	18
2.5.3. Durabilité.....	18
2.5.4. Développement des résistances.....	18
2.5.5. Développement des bétons à haute résistance.....	18
2.6. L'UTILISATION DES AJOUTS EN ALGERIE.....	19
2.7. LES AVANTAGES D'UTILISATION DES AJOUTS MINERAUX.....	19
2.7.1. Avantages techniques.....	19
2.7.2. Avantage économiques.....	19
2.7.3. Avantage écologiques.....	20
2.8. COMPORTEMENT DE CIMENT AVEC AJOUT.....	20
2.9. CLASSIFICATION DES AJOUTS.....	21
2. 10. MATERIAUX A PROPRIETES POUZZOLANIQUES.....	21
2. 10.1. Définitions.....	21
2.10.2. Les différent types d'ajouts.....	22
2.10.3. Activité pouzzolanique.....	24
2.10.4. Différentes utilisations de la pouzzolane.....	25
2.11. CONCLUSION.....	25

CHAPITRE3 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'ETAT DE

CONNAISSNACES DE LA PERLITE

3.1. INTRODUCTION.....	28
------------------------	----

3.2. LA PERLITE.....	28
3.2.1. Définition.....	28
3.2.2. Caractéristiques physique, chimique et minéralogique de la perlite.....	29
3.2.3 La perlite en Algérie.....	30
3.2.4 Localisation du gisement de la perlite de Hammam Boughrara.....	31
3.3. RECHERCHES EFFECTUEES SUR LA PERLITE.....	32
3.3.1. Résultats de la maniabilité des mortiers à base de perlite.....	32
3.3.2. Résultats de l'essai d'absorption capillaire.....	34
3.3.3. Résistances mécaniques des mortiers.....	35
3.4. CONCLUSION.....	38

PARTIE II : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

CHAPITRE 1 : MATERIAUX UTILISES

1.1. INTRODUCTION.....	42
1.2. MATERIAUX UTILISES.....	42
1.2.1. Le ciment.....	42
1.2.2. Perlite	43
1.2.3. Sable	45
1.2.4. Eau de gâchage	46
1.2.5. Adjuvant.....	46
1.3. CONCLUSION.....	46

CHAPITRE 2 : METHODES EXPERIMENTALES

2.1. INTRODUCTION.....	48
2.2. ESSAIS SUR MORTIERS A L'ETAT FRAIS.....	48
2.3.1. Formulations des mortiers.....	48

2.3.2. Maniabilité des mortiers.....	48
2.3.2.1. Equipement utilisé	48
2.3.2.2. Conduite de l'essai.....	49
2.2.2.3. Confection des mortiers.....	50
2.3.4. Confection des éprouvettes.....	52
2.3. ESSAIS SUR MORTIERS A L'ETAT DURCI.....	53
2.3.1. Essais d'absorption capillaire	53
2.3.2. Détermination de l'indice d'activité Pouzzolanique.....	55
2.4.3. Essais de résistances mécaniques.....	55
2.5. CONCLUSION.....	59

PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE 1 : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT FRAIS

1.1. INTRODUCTION.....	62
1.2. MANIABILITE.....	62
1.3. CONCLUSION.....	63

CHAPITRE 2: RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT DURCI

2.1. INTRODUCTION.....	65
2.2. RESULTATS DE L'ESSAI D'ABSORPTION CAPILLAIRE.....	65
2.3. RESISTANCES MECANIQUES DES MORTIERS.....	67
2.3.1. Résistances à la traction des mortiers à base de perlite.....	67
2.3.2. Résistance à la compression des mortiers à base de perlite.....	68
2.4. CONCLUSION.....	69
CONCLUSION GENERALE	72

Liste des figures

- Figure 1.1 : Le processus de fabrication du ciment Portland.
- Figure 1.2 : Les hydrates
- Figure 3.1 : Différents degrés de perlitisation
- Figure 3.2 : Localisation du gisement de HammemBoughrara (TLEMEN)
- Figure 3.3 : Coupe verticale géologique du gisement de Hammam Boughrara
- Figure 3.4 : Temps d'écoulement en fonction du dosage en Perlite des mortiers
- Figure 3.5: Evolution des coefficients d'absorption capillaire des différents mortiers
- Figure 3.6: Evolution des résistances à la traction (MPa).
- Figure 3.7. Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des mortiers dans l'eau saturée en chaux
- Figure 3.8: Evolution des résistances à la compression (MPa).
- Figure 3.9. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers dans l'eau saturée en chaux
- Figure. 1-1: Gisement à Hammam Boughrara (Tlemcen)
- Figure 1-2: Perlite naturelle (a), concassée (b), broyée (c)
- Figure 1.3 : Zone industrielle Fornaka Mostaganem.
- Figure 1.4 : sable siliceux d'Adwan
- Figure 2.1 : Maniabilimètre(LCPC) pour mortier.
- Figure 2.2 : procédure de l'essai de maniabilité
- Figure 2.3 : Malaxeur automatique à mortier
- Figure 2.4 : Moule d'éprouvettes prismatiques (40x40x160)mm
- Figure 2.5 : Aspect des éprouvettes après démoulage
- Figure 2.6: Eprouvettes dans le récipient en position verticale avec un niveau d'eau constant 3mm
- Figure 2.7 : la pesée des éprouvettes
- Figure 2.8 : la machine de résistance mécanique
- Figure 2.9 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion
- Figure 2.10 : l'état des résultats après l'essai de résistance à la flexion
- Figure 2.11: Dispositif de rupture en compression.
- Figure 2.12 : l'état des éprouvettes après la compression
- Figure 3.2 : Temps d'écoulement en fonction du dosage en Perlite des mortiers
- Figure 3.1: Evolution des coefficients d'absorption capillaire des différents mortiers
- Figure 3.2 : Evolution des résistances à la traction (MPa).
- Figure 3.3 : Evolution des résistances à la compression (MPa).

Liste des tableaux

Tableau. 1-1: Les principales phases du ciment Portland

Tableau 1.2 : Composition chimique et minéralogique du clinker

Tableau 1.3 : Principales catégories de ciment

Tableau 2.1. : Récapitulatif des avantages des ajouts cimentaires

Tableau 2.2 classification des ajoutes cimentaires selon leur nature et activité

Tableau 3.1. Propriétés physiques de la perlite brute

Tableau 3.2. Analyses chimiques (% en masse) de perlite brute de divers pays

Tableau 3.3. Les principaux gisements de la perlite de Maghnia

Tableau 3.3 : Dosages du plastifiant des mortiers à base de Perlite

Tableau 3.4 : Proportions des mélanges de différents mortiers

Tableau 3.51: Résistances à la traction (MPa)

Tableau 3.62: Résistances à la compression (MPa)

Tableau 1.1 : caractéristique physique du ciment CPJ-CEM II/A 42.5

Tableau 1.2 : Composition chimique du ciment CPJ-CEM II/A 42.5

Tableau 1-4: Caractéristiques physiques de Perlite

Tableau 2.1 : Formulations des mortiers

Tableau 2.2 : Classe de consistance selon la durée d'écoulement [LA NORME EN 206-1].

Tableau 2.3 : les opérations du malaxage de mortier [LA NORME EN 196-1].

Tableau 3.1: la maniabilité des mortiers

Tableau 3.2 : Tableau 3..1 : Masses de différentes éprouvettes de mortiers en grammes

Tableau3.2 : Coefficients d'absorption capillaire

Tableau 3.3 : Résistances à la traction par flexion (MPa).

Tableau 3.4 : Résistances à la compression (MPa).

Résumé

Les ajouts cimentaires actifs à caractère pouzzolanique font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés mécaniques des matériaux cimentaires (mortier).

D'autre part leur utilisation a pour objectif de réduire la consommation de clinker (ciment), en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement.

Ce travail expérimental étudie les avantages et la possibilité de substitution partielle du ciment par les ajouts pouzzolaniques naturels tels que la perlite et leur influence sur l'activité pouzzolanique des mortiers. Cette étude avait pour objectif de préparer un ciment avec addition minérale en substituant en volume (15% et 25%) la perlite de Maghnia au ciment. Le but de ce travail est d'étudier l'effet de la perlite sur les propriétés physiques, le comportement mécanique (résistance mécanique à la compression et à la traction) ainsi que l'absorption capillaire.

Les résultats ont montré que les mortiers à base de 15 et 25% de la perlite sont inférieures à celle du mortier témoin et cela au très jeune et à jeune âge (3, 7 et 14 jours) D'après la synthèse des travaux, il ressort que ces taux contribuent positivement à long terme (28 et 60 jours) par rapport au mortier témoin.

L'absorption capillaire est plus faible dans un mortier à base de perlite à 25% par rapport à 15% de mortier et au mortier témoin. D'où l'intérêt majeur de valoriser ce matériau comme substitut partiel au ciment.

Mots-clés: perlite, ciment, mortier, comportement mécanique, absorption capillaire

Abstract

Active cement additions of a pozzolanic nature are currently one of the most recent developments in cement production, because their uses improve the mechanical properties of cementitious materials (mortar).

On the other hand, their use aims to reduce the consumption of clinker (cement), contributing in a simple and economical way to solve the problems related to the environment.

This experimental work studies the advantages and the possibility of partial substitution of cement by natural pozzolanic additions such as perlite and their influence on the pozzolanic activity of mortars. This experimental study consists in preparing a cement with mineral addition by substituting the Maghnia perlite for the volume with cement at various replacement rates (15%, and 25%).

The results showed that the mortars based on 15 and 25% of perlite are inferior to that of the control mortar and that at very young and young age (3, 7 and 14 days) According to the summary of the work, it appears that these rates contribute positively in the long term (28 and 60 days) compared to the control mortar.

Capillary absorption is lower in a 25% perlite based mortar compared to 15% in control mortar and mortar. Hence the great interest in developing this material as a partial substitute for cement.

Keywords: perlite, cement, mortar, mechanical behavior, capillary absorption.

ملخص

الإضافات الاسمنتية الفعالة ذات الطابع البوزولاني هي حالياً جزء من أحدث التطورات في إنتاج الاسمنت لان استخداماتها توفر تحسناً في الخواص الميكانيكية لمواد الاسمنت (الملاط) . من ناحية اخرى يهدف استخدامها للحد من استهلاك الاسمنت و المساهمة في حل بسيط و اقتصادي للمشاكل البيئية.

يدرس هذا العمل التجريبي مزايا وإمكانية الاستبدال الجزئي للأسمنت عن طريق الإضافات البوزولانية الطبيعية مثل البيرلايت وتأثيرها على النشاط البوزولاني للملاط. تتألف هذه الدراسة التجريبية من تحضير الأسمنت مع إضافة المعادن عن طريق استبدال بيرلايت مغنية بالحجم مع الاسمنت بمعدلات استبدال مختلفة (15% و 25%).

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير البيرلايت على الخواص الفيزيائية والسلوك الميكانيكي (المقاومة الميكانيكية للضغط والجر) وكذلك الامتصاص الشعري.

أظهرت النتائج أن الملاط الذي يحتوي على 15% و 25% من البيرلايت أقل من ملاط الشاهد وأنه في سن مبكرة جداً (3 و 7 و 14 يوم) حسب ملخص الاعمال ، يوضح أن هذه المعدلات تساهم بشكل إيجابي على المدى الطويل (28 و 60 يوماً) مقارنة بملاط الشاهد.

. يكون الامتصاص الشعري أقل في ملاط أساسه البيرلايت بنسبة 25% مقارنة بـ 15% في ملاط وملاط التحكم. ومن هنا جاء الاهتمام الكبير بتطوير هذه المادة كبديل جزئي للأسمنت.

الكلمات المفتاحية: البيرلايت ، الاسمنت ، الملاط ، السلوك الميكانيكي ، الامتصاص الشعري.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Différents ajouts minéraux sont actuellement utilisés plus en plus dans les mortiers, ils sont utilisés en addition ou en substitution d'une partie du ciment comme matières cimentaires supplémentaires, pour plusieurs raisons soit pour des raisons économiques, soit pour améliorer certaines propriétés du mortier frais ou durci, soit pour des raisons écologiques (effet de serre). La production d'une tonne de ciment libère environ la même quantité de CO₂ dans l'atmosphère le remplacement d'une partie de ciment par des ajouts cimentaires permettra de diminuer de façon systématique la quantité de CO₂ émise.

L'utilisation des ajouts dans la production des ciments Portland a résolu en grande partie le problème d'autosuffisance nationale, ainsi que celui de la baisse du coût énergétique. En faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciments avec les propriétés physico-mécaniques demandées.

Le sous-sol algérien enfouit de considérables ressources minières qui peuvent se substituer au ciment. L'exploration de ces ressources peut aboutir à des solutions pour rendre le ciment plus performant, plus économique et moins polluant, et apporter une très forte valeur ajoutée. Pour cela, nous avons opté dans notre travail à explorer la possibilité d'utilisation de la perlite naturelle de MAGHNIA (substance d'origine volcanique) comme ajout cimentaire pouzzolanique.

L'objectif de notre étude a été d'évaluer expérimentalement l'influence du taux d'ajout de perlite de MAGHNIA (15% et 25%) sur les caractéristiques physico-mécaniques des mortiers. Malheureusement, la pandémie du covid-19 que traverse le pays a obligé l'état prendre des restrictions et préventions sanitaires ce qui a rendu le travail expérimental dans le laboratoire du département de génie civil et d'architecture impossible. C'est pour cette raison on n'a pas pu finaliser tous les échéances des essais mécaniques sur mortiers (28 et 60 jours), ainsi que les essais de consistance et prise des pâtes de ciment.

Structure du document :

Ce mémoire se compose de trois parties :

La première partie : Etude bibliographique.

Le premier chapitre comporte les généralités sur les matériaux cimentaires en évoquant principalement les mécanismes d'hydratation du ciment Portland et les propriétés de ses phases hydratées.

Le deuxième chapitre présente la caractérisation et la classification des ajouts cimentaires pouzzolaniques d'origine volcanique dont la perlite est l'ajout minéral qui fait l'objet de notre étude.

Le troisième chapitre est consacré aux ajouts minéraux notamment la perlite naturelle de MAGHNA qui fait l'objet de notre étude. Sa classification, ses intérêts d'utilisation dans le domaine de génie civil sont présentés, ainsi qu'une synthèse des recherches sur les propriétés physiques (absorption capillaire) et mécaniques (résistances à la compression) des mortiers contenant la perlite de Maghnia.

La deuxième partie : Matériaux et procédures d'essais.

L'ensemble des matériaux utilisés dans l'élaboration des différents mortiers et leur identification sont décrits dans le premier chapitre.

Quant au second, il explique les différentes méthodes et techniques utilisées dans cette étude expérimentale.

La troisième partie : Résultats et discussions

Dans le premier chapitre les résultats des différents essais de caractérisation à l'état frais

Le deuxième chapitre comporte les résultats et leurs discussions relatifs aux essais d'absorption d'eau ainsi que les résistances mécaniques effectués sur les différents mortiers.

Enfin, ce mémoire sera clôturé par une conclusion générale inspirée des résultats obtenus et par des perspectives que nous avons jugé utiles de poursuivre dans notre prochaine recherche éventuelle.

PARTIE I
PARTIE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LE CIMEN PORTLAN

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE CIMEN PORTLAND

1.1. INTRODUCTION

La découverte des ciments remonte à l'ère des Romains, il y a deux mille ans, qui furent les premiers à utiliser les propriétés hydrauliques de la chaux résultant de la décarbonatation des calcaires pour la construction de leur maçonnerie, routes et aqueducs [Batirama, 2017].

L'invention du ciment portland est généralement attribuée à JOSEPH ASPDIN, un maçon anglais celui-ci obtient en 1824 un brevet pour son produit, qu'il nomma ciment portland parce qu'il produisait un béton qui avait la couleur de l'excellente pierre naturelle extraite de la presque île calcaire de Portland située sur la Manche, à l'ouest de l'île de Wright en Angleterre le nom a été conservé et est utilisé partout dans le monde [Edwin C, 1913].

La norme ASTM C-150 définit le ciment Portland comme un ciment hydraulique produit par la pulvérisation du clinker, essentiellement composé de silicates de calcium, avec une faible quantité de sulfate de calcium (qui peut être ajouté sous différentes formes). Les ciments portland sont des liants hydrauliques, c'est-à-dire que leur prise et leur durcissement se fait en se combinant avec l'eau cette réaction, appelée hydratation.

1.2. HISTORIQUE

Le ciment dit « ciment Portland » c'est le matériau du 20^e siècle, il n'a guère plus d'une centaine d'années. L'écossais " Aspdin " prit un brevet d'invention en 1824, sur la fabrication d'un liant à partir d'un mélange de chaux et d'argile qu'il appela "ciment Portland" à cause de l'aspect présenté par ce liant durci qui rappelait celui de la pierre calcaire de la Presqu'île de Portland. C'est le premier ciment, père d'une longue lignée.

Ainsi, le XX^e siècle a ouvert la voie aux ciments artificiels qui prendront progressivement le pas sur les chaux. L'accélération sera plus manifeste à l'issue de la deuxième guerre mondiale lorsque le secteur du bâtiment produit essentiellement des logements neufs bâtis à partir d'éléments préfabriqués et, n'utilisant plus les chaux.

C'est l'époque charnière où la chaux est en passe d'abandon, où son ancienneté est une marque d'archaïsme alors que les ciments améliorent les performances des liants. [Amaury Cudeville, 2011]

1.3. LIANT HYDROLIQUE : CIMENT

Un liant hydraulique est un liant qui se forme et durcit par réaction chimique avec de l'eau et est

aussi capable de le faire sous l'eau, ce que l'on nomme hydraulité. Il est utilisé dans la construction et dans l'industrie routière afin de répartir la pression uniformément sur toute la surface des particules.

1.4. LES ETAPES DE FABRICATION DU CIMENT

La figure 1.1 montre le processus de fabrication du ciment Portland:

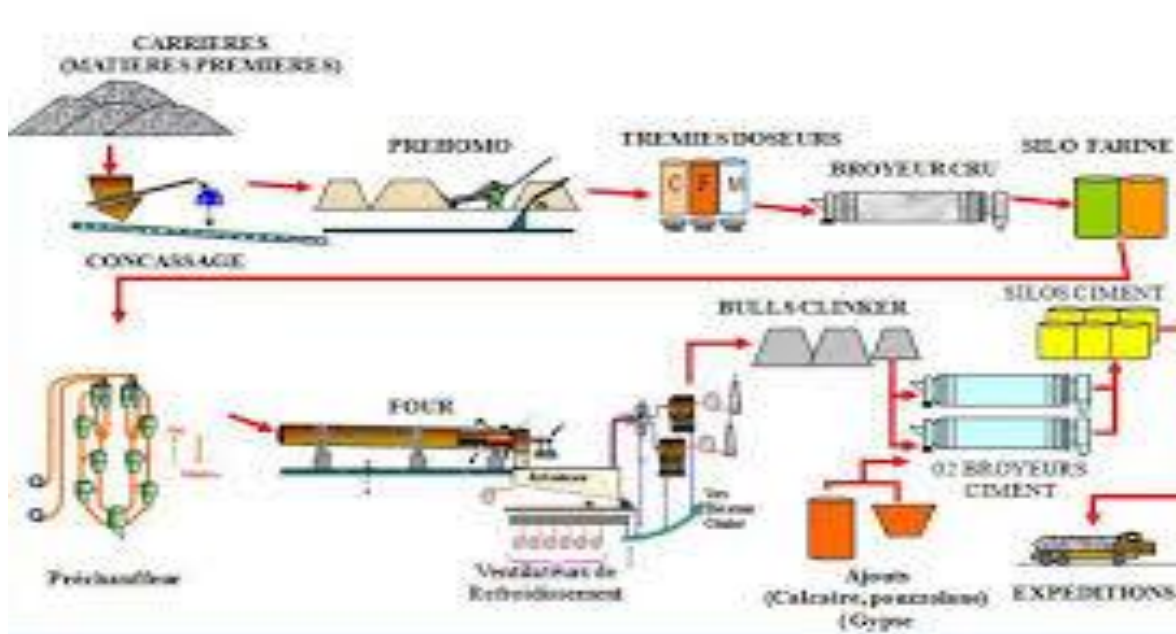


Figure I.1 : Le processus de fabrication du ciment Portland. [Bessenouci, 2010]

1.4.1. Préparation de la matière première

Le constituant principal du ciment est le clinker qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange très finement broyé (qu'on appelle le " cru ") approprié de calcaire et d'argile, en proportion moyenne de 80 % de calcaire et 20 % d'argiles (silico aluminates). Ces matières premières sont présentes dans les roches naturelles, les marnes ou calcaires argileux qui ont une composition proche de 80 % calcaire- 20 % argiles , généralement des correcteurs de composition, minerai de fer qu'apporte Fe_2O_3 , bauxite (Al_2O_3), sable (SiO_2) sont ajoutés en faible proportion pour atteindre la composition souhaitée [Manuel, 2008 ; Cimbeton T14] .

1.4.2. Préparation du cru

Le composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3), et l'oxyde de fer (Fe_2O_3). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en

particulier Fe_2O_3 , l'oxyde ferrique. Les matières premières sont finement broyées (0,1mm) afin d'obtenir le "cru" [**Cimbeton T14**].

1.4.3. Le séchage et le broyage

Pour favoriser les réactions chimiques qui suivent, les matières premières doivent être séchées et broyées très finement (quelques microns) dans des broyeurs à boulets ou dans des broyeurs à meules verticaux. Ces derniers, plus récents, sont plus économiques en énergie et permettent un séchage plus efficace. Ensuite 3 voies sont possibles : la voie humide, la voie sèche et semi-sèche. La première est plus ancienne et implique une grande consommation d'énergie pour évaporer l'eau excédentaire. Dans ces procédés, les matières premières sont parfaitement homogénéisées et séchées lors de l'opération de broyage afin d'obtenir la farine. Celle-ci peut être introduite directement dans le four sous forme pulvérulente (voie sèche), ou préalablement transformée en "granules" par humidification (voie semi sèche).

1.4.4. La cuisson ou calcination

La cuisson se fait à une température voisine de 1450 °C dans un four rotatif, long cylindre tournant de 1,5 à 3 tour/minute et légèrement incliné. La matière chemine lentement et se préchauffe le cru à environ 800°C. A la sortie du four, un refroidisseur à grille permet d'assurer la trempe des nodules incandescents et de les ramener à une température d'environ 100°C. Tout au long de la cuisson, un ensemble de réactions physico-chimiques conduit à l'obtention du clinker [**Lafargeholcim**].

Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile (silicates d'alumine et d'oxyde de fer), se combinent avec la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et aluminates de chaux.

1.4.5. Le broyage du ciment

Pour obtenir un ciment aux propriétés hydrauliques actives, le clinker doit être à son tour broyé très finement. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets. Les corps broyant sont constitués de boulets d'acier qui, par choc, font éclater les grains de clinker et amènent progressivement le ciment à l'état de fine farine, ne comportant que très peu de grains supérieurs à 80 microns. A la sortie du broyeur, un cyclone sépare les éléments suffisamment fins des autres qui sont renvoyés à l'entrée du broyeur. C'est également lors du broyage que l'on ajoute au clinker le gypse (3 à 5%) indispensable à la régulation de prise du ciment. On obtient alors le ciment "Portland". Les ciments avec "ajouts" sont obtenus par l'addition au clinker, lors de son broyage, d'éléments minéraux supplémentaires contenus par exemple dans les laitiers de hauts fourneaux, les cendres de centrales thermiques, les fillers calcaires, les pouzzolanes naturelles. Ainsi sont obtenues les différentes catégories de ciments qui permettront la réalisation d'ouvrage allant du

plus courant au plus exigeant [Lafargeholcim ; Manuel, 2008].

1.5. LES CONSTITUANTS DUCIMENT

1.5.1. le clinker

Le ciment résulte du broyage d'un certain nombre de constituants. Le plus important étant le clinker formé de silicates et d'aluminates de chaux.

Dans la zone de clinkérisation du four, les éléments simples (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3) se combinent pour donner les constituants minéraux suivants.

Les principales phases du ciment Portland sont données par le (tableau I.1) :

Tableau. I-1: Les principales phases du ciment Portland [Bessenouci., 2010]

Composé	Composition	Abréviation
Silicate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C3S
Silicate bicalcique	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C2S
Aluminate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C3A
Aluminoferritetétracalcique	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C4AF

Les compositions chimiques et minéralogiques du clinker sont comprises dans les limites données par le (tableau I.2) :

Tableau 1.2 : Composition chimique et minéralogique du clinker [Baron et al, 1997].

Composants (%) Minéralogique	Teneurs limites	Teneur moyenne (%)
C₃S	40-70	60
C₂S	00-30	15
C₃A	02-15	08
C₄AF	00-15	08
Oxydes		
CaO	60-69	65
SiO₂	18-24	21
Al₂O₃	04-08	06
Fe₂O₃	01-08	03
MgO	< 05	02
K₂O, Na₂O₃	< 02	01
SO₃	< 03	01

a) Broyabilité du clinker

Le clinker présente une bonne broyabilité s'il contient plus de C₃S, moins de C₃A et une forte microfissuration lors du refroidissement(le plus possible de petits cristaux).Selon certain

chercheurs, plus le rapport $[(C_3S + C_2S) / (C_3A + C_4AF)]$ est élevé, plus facile est la broyabilité [Makhlouf, 2000].

b) Classification et domaine d'application des ciments

L'industrie cimentière commercialise de nombreux types de ciments afin de répondre aux différents problèmes rencontrés lors de la construction des ouvrages :

- 1- Résistances mécaniques
- 2- Résistance à une attaque physique ou chimique
- 3- mise en œuvre particulier

Tableau I.3 : Principales catégories de ciment [Cimbeton T14]

Désignations	Notation	Clinker	Autres constituants	Constituants secondaires
Ciment Portland	CPA -CEM I	95-100	----	0-5
Ciment Portland composé	CPJ-CEM II/A	80-94	6-20	---
	CPJ-CEM II/B	65-79	21-35	---
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A	35-64	36-65	0-5
	CHF-CEM III/B	20-34	66-80	0-5
	CLK -CEM III/C	5-19	81-95	0-5
Ciment pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A	65-90	10-35	0-5
	CEM-CPZ IV/B	45-64	36-55	0-5
Ciment composé (Ciment au laitier et aux cendres)	CLC-CEM V/A	40-64	18-30	0-5
	CLC-CEM V/B	20-39	31-50	0-5

Avec les notations abrégées correspondes qui sont comme suit :

CEM pour indiquer que le produit est un ciment.

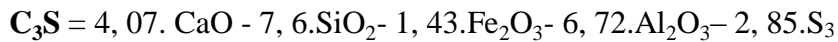
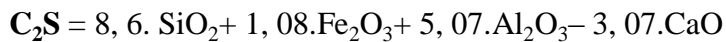
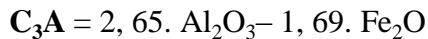
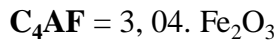
Un chiffre romain **1, 2, 3, 4** ou **5** pour indiquer le type de ciment.

Pour le ciment **2 ; 3 ; 4** et **5** une lettre **A, B, C** pour indiquer la proportion des constituants. Le nombre indiquant la classe de résistance **32.5, 42.5, 52.5** suivi de la lettre **R** pour signaler une résistance élevée au jeune âge (2 jours)

c) Calcul de la composition minéralogique du clinker [Kedjour,2003]

Sur la base de l'analyse chimique, R.H. BOGUE a élaboré une méthode pour le calcul de la composition minéralogique du clinker.

❖ Les équations ou formules de Bogue



1.5.2. Le gypse (CaSO₄)

Le clinker « pur » très fin est caractérisé par de courts délais de prise (3 à 5 min), ce qui le rend pratiquement inutilisable. Ce fait est surtout dû à la célite (C₃A) qui s'hydrate rapidement tandis que ses hydrates deviennent rapidement compacts et se cristallisent. Il s'ensuit que pour ralentir la prise du ciment, il faut lier les hydroaluminates de calcium en d'autres composés. Ce rôle peut bien être joué par le gypse qui réagit énergiquement avec l'hydroaluminate tricalcique et produit un sel insoluble l'hydrosulfoaluminate de calcium (3CaO.Al₂O₃.3CaSO₄.31H₂O). [Cimbeton T14]

La quantité à introduire doit correspondre à la teneur en C₃A dans le liant et lorsque cette teneur en gypse est respectée, l'action des hydroaluminates de calcium se trouve paralysée au moment initial.

1.5.3. Les ajouts minéraux

Ces ajouts jouent le rôle suivant: d'après leur composition ils se présentent principalement par de la silice amorphe qui réagit activement avec l'hydroxyde de chaux qui se forme lors de l'hydratation des minéraux faisant partie du clinker. Le rapport entre le clinker et l'adjuvant hydraulique (ajout minéral) est établi en fonction de l'activité de l'adjuvant et de la composition minéralogique du clinker. [Cimbeton T14]

1.6. HYDRATATION DU CIMEN PORTLAND

Comme le ciment portland est un mélange hétérogène de plusieurs composés, son processus d'hydratation est un ensemble de réactions simultanées des substances anhydres avec l'eau.

Tous les composés ne réagissent pas de la même manière: les aluminates sont réputés pour réagir plus rapidement que les silicates, c'est pourquoi la rigidité (perte de consistance) et la prise caractéristiques à la pâte de ciment portland sont généralement attribuées aux réactions des aluminates, alors que les silicates, constituant près de 75% du ciment ordinaire, jouent un rôle prépondérant dans le durcissement initial (Taux de développement de résistance) du matériau.

I.7. CINETIQUE ET CHALEUR D'HYDRATATION

Les minéraux du ciment présentent des vitesses d'hydratation différentes. C_3A et C_3S s'hydratent plus vite que C_4AF et C_2S . La réaction d'hydratation du ciment portland est exothermique, la quantité de chaleur dégagée par hydratation d'un gramme de ciment portland à 28 jours est de 400 – 500 joules qui se répartissent de la manière suivante, entre les silicates et les aluminates, étudiés séparément. Le premier signal correspond aux réactions immédiates entre le C_3S et l'eau (adsorption des molécules d'eau), le second effet thermique traduit la précipitation de $Ca(OH)_2$ et C-S-H [Bouglada, 2008].

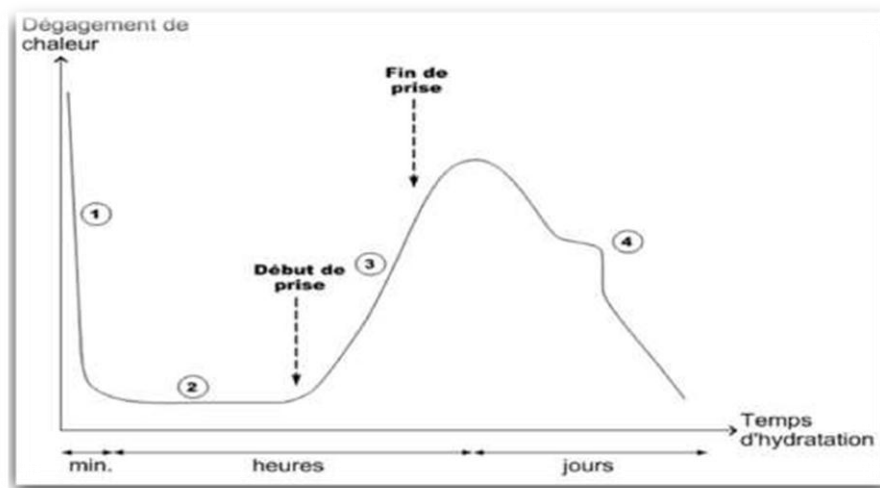


Figure I.2 : Courbe typique de calorimétrie isotherme d'un Ciment [Bouglada, 2008]

Période 1 : Réactions 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.

Période 2 : Période dormante

Durant cette période, des ions Ca^{2+} et OH^- sont libérés. Ceci augmente alors le pH de la solution, ralentissant la dissolution des constituants. Le dégagement de chaleur est alors faible. Cette période correspond à la phase durant laquelle le béton est maniable.

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 portlandite. Il s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des

hydrates (étrangéité, portlandite, C- S- H). Cette grande activité chimique dégage beaucoup de chaleur, augmentant la température du matériau.

Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer permettant alors la création d'un solide rigide. La prise du béton se situe donc dans cette période. Elle correspond au moment où le béton passe de sa phase liquide à sa phase solide, c'est-à-dire qu'un chemin continu de particules liées mécaniquement traverse le solide

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. Ainsi, cette période se traduit sur la courbe par une diminution de la chaleur dégagée. Si le réseau poreux est fermé, une partie du ciment n'est jamais atteinte et donc ne sera jamais hydratée. De plus la quantité d'eau au départ doit être suffisante

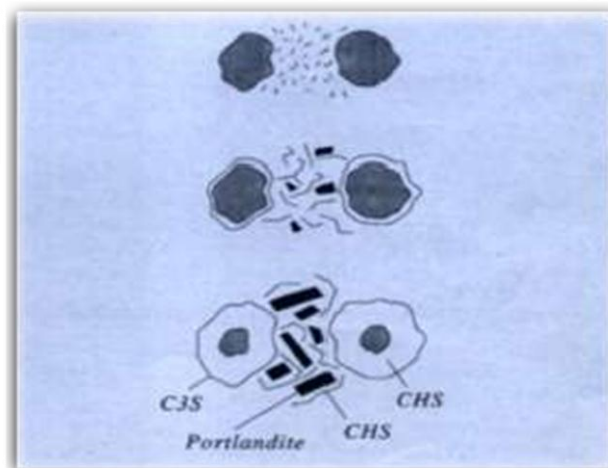


Figure I.2 : Les hydrates [Bouglada, 2008].

1.8. PROPRIETES TECHNIQUES DU CIMEN PORTLAND

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 » [Kedjour, 2003].

- La surface spécifique
- 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.

1.9. CONCLUSION

A la fin de l'hydratation du ciment, les principaux produits hydratés sont :

- ❖ Les silicates de calcium hydraté ou C-S-H, généralement amorphes dont le ration Ca/Si varie, ils contiennent 60 à 70% en masse d'une pâte de cimenthydratée.
- ❖ L'hydroxyde de calcium ou Portlandite $[Ca(OH)_2]$, représente 5 à 15% en masse d'une pâte de cimenthydratée.
- ❖ Les sulfo-aluminates de calcium, l'ettringite et le monosulfate constituent 20 à 30% de la masse totale.

Les proportions citées ci-dessus correspondent aux CPA-CEM I, dans les autres classes de ciments, elles peuvent être très différentes compte tenu des différents ajouts minéraux (laitier, cendres volantes, fumée de silice, les tufs . . .).

Les ajouts cimentaires pouzzolaniques sont caractérisés par une teneur élevée en dioxyde de silicium seul ou, en dioxyde de silicium et enoxyde d'aluminium combiné. Ils peuvent réagir avec la chaux hydratée (portlandite), libérée ors de l'hydratation du ciment Portland pour former des composés ayant des propriétés liantes. Ces hydrates, se nomment en tant que produits de la réaction pouzzolanique et sont très semblables aux produits issus de l'hydratation du ciment Portland.

CHAPITRE 2

CHAPITRE 2

LES AJOUTS CIMENTAIRES

LES AJOUTS CIMENTAIRES

CHAPITRE 2 : LES AJOUTS CIMENTAIRES

2.1. INTROSUCTION

Un ajout est tout ingrédient autre que l'eau ou le ciment qui est ajouté à ces deux composés pendant le malaxage pour améliorer leurs caractéristiques hydrauliques et rhéologiques (stabilité et fluidité), pour augmenter ou diminuer leur temps de prise ou pour assurer des critères de performance obtenus à long terme de la pâte de ciment (résistance, chaleur dégagée, etc.)

L'utilisation d'ajouts dans le ciment remonte à l'ère des Chinois et des Romains les premiers ont utilisé les œufs comme ajouts lors de la construction de la muraille de Chine et les seconds ont utilisé du sang ou du lait dans leur béton [Paillere, A, M, 1982]. Actuellement, plus de 70% des mélanges produits contiennent au moins un ajout. On distingue généralement deux grandes familles d'ajouts: les ajouts chimiques (qui ne font pas l'objet de ce travail) appelés également adjuvants et les ajouts minéraux (appelés également les ajouts cimentaires).

L'utilisation des ajouts minéraux dans la production des ciments Portland a résolu en grande partie le problème d'autosuffisance nationale en ciments, ainsi que celui de la baisse du coût énergétique. En faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciments avec les propriétés physicomécaniques demandées.

2.2. LES AJOUTS CIMENTAIRES

Définition :

Les ajouts cimentaires sont des matériaux qui, combinés au ciment portland, contribuent aux propriétés du béton durci par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois. Les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé et les fumées de silice sont des exemples courants une pouzzolane est un matériau siliceux ou aluminosiliceux qui, finement divisé et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment portland pour former des composés possédant des propriétés liantes [Cement Association of Canada, 2005].

2.3. L'INTERET DE L'UTILISATION DES AJOUTS MINERAUX DANS LE GENIE CIVIL

L'utilisation d'ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton présente des avantages

techniques, économiques et écologiques.

2.3.1. Intérêt du point de vue technique:

L'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques.

Enfin, parce qu'ils permettent une faible chaleur d'hydratation des ciments composés, les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration [Djobo, 2007].

2.3.2. Intérêt du point de vue économique:

Le ciment Portland est le composant le plus onéreux au cours de la production du béton, puis qu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous-produits, et à ce titre, nécessite relativement moins d'énergie, si non aucune, et sont moins coûteux que le ciment Portland [Djobo, 2007].

2.3.3. Intérêt du point de vue environnemental:

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO₂). En effet, la substitution d'une fraction de clinker permet d'obtenir des ciments aux propriétés mécaniques exploitables, ce qui permet une diminution de rejets de CO₂. Le taux de substitution de clinker est du même ordre que la diminution de rejet de CO₂[Djobo, 2007].

2.4. LES INCONVENIENTS D'UTILISATION DES AJOUTS MINÉRAUX :

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

2.5. EFFETS DES AJOUTS SUR LES PROPRIÉTÉS DES BETONS :

2.5.1. Amélioration de l'ouvrabilité:

Si nous ajoutons une quantité d'une fine poudre à un béton, nous diminuons le ressuage et la ségrégation dans ce béton, en diminuant le volume des vides. L'utilisation des cendres volantes ou du laitier diminue le besoin en eau d'un béton pour obtenir une certaine consistance. Pour cette même

consistance l'utilisation de poudres ayant une très grande surface spécifique, comme les fumées de silice, tend à augmenter la quantité d'eau nécessaire. La demande en eau et la maniabilité d'un béton contenant des ajouts minéraux dépend de leur forme et de la granulométrie des particules. La norme ASTM C 618 limite la quantité des particules $> 45 \mu\text{m}$ à un maximum de 34 % [Bouglada, 2008].

2.5.2. Chaleur d'hydratation:

Le remplacement du ciment par une pouzzolane diminue de façon significative la chaleur d'hydratation du ciment, et par conséquent la fissuration d'origine thermique du béton.

La chaleur d'hydratation des ajouts pouzzolaniques est égale à environ la moitié de celle du ciment Portland.

2.5.3. Durabilité:

Par rapport au ciment Portland, les ciments aux ajouts pouzzolaniques ont une meilleure résistance aux acides et aux sulfates. Cela est dû à l'effet combiné d'une meilleure imperméabilité pour un même rapport E/L, et à une diminution de la quantité de CH.

Les sulfates peuvent détruire le béton en se combinant avec les aluminates du ciment pour former de l'ettringite expansive.

Les conditions pour que cette réaction se passe sont. La perméabilité du béton, la quantité de CH et la quantité d'aluminate dans le mélange à cause de leur bonne imperméabilité et surtout d'une faible quantité de CH, des bétons faits à partir de ciment au laitier résistent très bien à l'attaque des sulfates, malgré une quantité importante de C_3A dans le ciment.

Les ajouts pouzzolaniques tels que le laitier, diminuent l'expansion des bétons qui se produit par réactions entre les alcalis du ciment et les granulats réactifs. Les alcalis sont piégés dans le C-S-H formé par l'ajout [Bouglada, 2008].

2.5.4. Développement des résistances:

Bien que le développement des résistances soit lent, les résistances à long terme dépassent quelques fois celles du ciment Portland sans ajouts, à condition d'optimiser la quantité d'ajout. Cette Augmentation des résistances est due à l'affinage des pores et des grains ainsi qu'à l'augmentation de la quantité de C-S-H [Bouglada, 2008].

2.5.5. Développement des bétons à haute résistance :

L'utilisation des ajouts, pour des raisons d'ordre économique ainsi que pour améliorer la durabilité des bétons, en remplacement d'une partie du ciment, tend à diminuer les résistances initiales et à augmenter

les résistances finales .Les pouzzolanes très réactives, comme les fumées de silice, sont capables de donner des bétons à haute résistance, tant à jeune âge d'eau. Tous les ajouts utilisés qu'à long terme, surtout si la quantité d'eau est diminuée par l'addition d'un agent réducteur en remplacement partiel des granulats fins augmentent les résistances à tous les âges. Les résistances à jeune âge se développent à cause de l'accélération de l'hydratation du ciment, tandis que celles à long terme se développent grâce à la réaction pouzzolanique qui cause l'affinage des pores et le remplacement du CH par du C-S-H [Kerbouche and all, 2017].

2.6. L'UTILISATION DES AJOUTS EN ALGERIE

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

2.7. LES AVANTAGES D'UTILISER LES AJOUTS MINIREAUX

L'utilisation d'ajouts cimentaires dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques

2.7.1. *Avantages techniques :*

D'abord, l'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux à très grande surface active, comme les fumées de silice), de plus, les ajouts cimentaires améliorent généralement les propriétés mécaniques l'imperméabilité et la ténacité et aux attaques chimiques enfin , par ce qu'ils permettent une moindre chaleur d'hydratation les ciments avec ajouts et en plus grande capacité d'allongement en traction, les ajouts cimentaires améliorent la résistance à la fissuration d'origine thermique

2.7.2. *Avantages économiques :*

Typiquement, le ciment Portland est le composant le plus coûteux d'un mélange de béton, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plupart des matériaux susceptibles de remplacer le ciment dans le béton sont des sous-produits, et, à ce titre, demandent relativement moins d'énergie, sinon aucune, et sont beaucoup moins coûteux que le ciment Portland toutefois, la distance qui sépare la source des ajouts cimentaires et l'utilisateur final et le coût élevé du transport qui en résulte risquent de l'emporter sur leurs avantages économiques potentiels de même, le manque de stockage abordable est parfois une barrière à leur utilisation dans certains marchés. [Supplementary C, 2005].

2.7.3. Avantages écologiques (émission de gaz à effet de serre) :

La production d'une tonne de ciment Portland libre dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique de fait, le remplacement du ciment Portland par les ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de CO₂ en général, l'utilisation de cendres volantes et de fumées de silice comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie.

[Supplementarycementingmaterials, 2005].

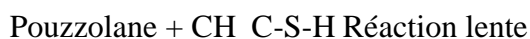
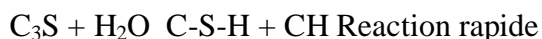
Tableau 2.1. : Récapitulatif des avantages des ajouts cimentaires

Avantages techniques	Avantages économiques	Avantages écologiques
<ul style="list-style-type: none"> * améliore la maniabilité * réduit la demande en eau¹ * amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton * diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton * diminue la fissuration d'origine thermique 	<ul style="list-style-type: none"> * leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation. * réduit le prix du béton pour le coût du combustible. 	<ul style="list-style-type: none"> * diminution de l'émission du CO₂ par l'industrie cimentière * élimination des sous-produits de la nature

2.8. COMPORTEMENT DU CIMENT AVEC AJOUT

Le comportement du ciment avec ajout minéral est déterminé par trois caractéristiques de la réaction pouzzolanique de l'ajout [Notes De Cours, 2006]:

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



1-La réaction est lente, le dégagement de chaleur et le développement des résistances seront également lents.

2- Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réaction pouzzolanique en consomme et améliore la résistance du béton en milieu acide.

3- Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons par affinage de ces pores capillaires et par transformation des gros cristaux de CH en un produit d'hydratation faiblement cristallisé (affinage des grains)[Notes De Cours, 2006].

2.9. CLASSIFICATION DES AJOUTS

Tableau 2.2 classification des ajoutes cimentaires selon leur nature et activité [Der Guettalla et Der Mezghiche 2001]

Genre de matières	Type	Activité	Exemples
Matières minérales	Hydraulique	Hautement actif	* ciments spéciaux * chaux hydraulique
	Hydraulique latente	Hautement actif	*laitier granulé (laitier de haut fourneau vitreux granulé) *cendres riches en calcium (cendres volantes calciques)
	Pouzzolanique	Hautement actif	*fumée de silice
		Moyennement actif	* cendres volantes pauvre en calcium (cendres siliceuses) * pouzzolanes naturelles telles que : - verres volcaniques, - tufs volcaniques, - trass, - phonolithe, - terre à diatomées
		Faiblement actif	* scories cristallines
	Filler	Inerte	* poudres minérales telles que : -farine calcaire, - poudre de quartz
	Fibres	inerte	* Fibres d'acier ou de verre
Matières expansives	----	* ciments expansifs * oxyde de calcium * matières libérant des gaz	
Pigments colorants	Inerte	* oxydes et sels métalliques,* terres colorantes, * craie, graphite, * sépia, carmin,* colorants dérivés des goudrons, *couleurs de l'aniline	
Matières organiques	Fibres	Inerte	* fibres synthétiques (polypropylène, polyamide)
	Dispersions synthétiques	----	* dispersions telles que : - polyvinyl propionate, polyvinylacétate, - polyacrélate, latex au styrène – butadiène, latex au néoprène * dispersion à base de résines époxydes

2. 10. MATERIAUX A PROPRIETES POUZZOLANIQUES

2.10.1. Définitions

Par pouzzolane naturelle on désigne au sens strict les pyroclastites, qui sont des projections des éruptions volcaniques.

Les pouzzolanes sont composées essentiellement de la silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_2).La partie restante contient de l'oxyde de fer et d'autres oxydes ainsi qu'un pourcentage de chaux (CaO). Elles sont généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise.

Les pouzzolanes les plus acides, contenant de silice et peu de chaux (CaO) sont en général la plus vitreuses. La différence $\text{SiO}_2\text{-CaO}$ doit être supérieure à 34% pour que la teneur en verre soit

appréciable. Définit les pouzzolanes comme des matériaux n'ayant pas de propriétés liantes entre eux-mêmes, mais qui en se combinant avec de la chaux à température ordinaire et en présence d'eau, forment des composés insolubles stables possédant des propriétés liantes.

Selon la norme ASTM sur les ciments (désignation C 340-58 T), la définition est pratiquement similaire :

La pouzzolane se définit comme étant un matériau siliceux ou silico-alumineux, qui ne possède pas de propriétés liantes, mais qui sous forme de poudre très fine et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes.

Les deux dernières définitions attirent l'attention sur le fait que la pouzzolane est définie en fonction de son emploi comme matériau liant et non sur la nature du matériau lui-même. Puisque, les phénomènes responsables du durcissement du mélange pouzzolane + chaux du point de vue chimiques et physiques ne sont pas considérés.

2.10.2. Les différents types d'ajouts

Les ciments avec ajouts (ciments composés) sont obtenus par l'addition, lors de broyage du clinker, du gypse et d'éléments minéraux comme les laitiers de hauts fourneaux, les cendres de centrales thermiques, les fillers calcaires, les pouzzolanes naturelles ou artificielles. Ainsi sont obtenues les différentes catégories de ciments qui permettront la réalisation d'ouvrages allant du plus courant au plus exigeant [Chihaoui, 2008].

- **Le gypse (CaSO_4)**

Le clinker « pur » très fin est caractérisé par de courts délais de prise (3 à 5 min), ce qui le rend pratiquement inutilisable. Ce fait est surtout dû à la célite (C3A) qui s'hydrate rapidement tandis que ses hydrates deviennent rapidement compacts et se cristallisent.

Il s'ensuit que pour ralentir la prise du ciment, il faut lier les hydroaluminates de calcium en d'autres composés. Ce rôle peut bien être joué par le gypse qui réagit énergiquement avec l'hydroaluminate tricalcique et produit un sel insoluble l'hydrosulfoaluminate de calcium ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$). La quantité à introduire doit correspondre à la teneur en C3A dans le liant. Lorsque cette teneur en gypse est respectée, l'action des hydroaluminates de calcium se trouve paralysée au moment initial.

- **Ajout minéral actif**

Ces ajouts qui jouent le rôle suivant : d'après leur composition ils se présentent principalement par de la silice amorphe qui réagit activement avec l'hydroxyde de chaux qui se forme lors de l'hydratation des

minéraux faisant partie du clinker.

Le rapport entre le clinker et l'adjuvant hydraulique (ajout minéral) est établi en fonction de l'activité de l'adjuvant et de la composition minéralogique du clinker. Plus l'adjuvant est actif, plus il peut fixer l'oxyde de calcium hydraté et moins il faudra de ciment pouzzolanique [Senhadji. 2006].

Parmi les ajouts les plus utilisés, on mentionne :

- **Les laitiers de haut-fourneau**

On obtient du laitier granulé de haut fourneau par refroidissement rapide de la scorie fondue, c'est-à-dire des résidus provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Il est constitué, en masse, d'au moins deux tiers de CaO, MgO et SiO₂, le reste contenant Al₂O₃ et de faibles quantités d'autres oxydes.

Les laitiers existent sous forme de poudre fine, sèche. Ils sont considérés comme un matériau hydraulique latent, qui présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable, en effet, l'ajout d'eau à un échantillon de laitier vitrifié n'entraîne aucun durcissement du mélange.

L'hydratation des laitiers engendre la formation de CSH (silicate de calcium hydraté), d'aluminates (AC₂H₇) et de silicoaluminates (dérivés de l'ettringite) [Berraih. 2010].

- **Les cendres volantes :**

Si la proportion de cendres volantes dans le ciment excède 5 % en masse (constituant principal), seules les cendres volantes satisfaisant aux spécifications suivantes doivent être utilisées :

Les cendres volantes peuvent être de nature silico-alumineuse (Cendres volantes siliceuses (V)) ou silico-calcaire (Cendres volantes calciques (W)). Les premières ont des propriétés pouzzolanique; les dernières peuvent avoir, en plus, des propriétés hydrauliques.

Les cendres volantes sont obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes provenant du courant de gaz des chaudières, alimentées au charbon pulvérisé. Les cendres obtenues par d'autres méthodes ne doivent pas être utilisées dans les ciments conformes à la norme Algérienne [Norme Algérienne. 2000].

- **Les fumées de silice**

La fumée de silice est un coproduit industriel de la fabrication du silicium métallique ou de divers alliages de Ferro silicium.

Elle est produite lors de la réduction du quartz très pur par du charbon dans un four à arc électrique. Elle est recueillie par filtration des gaz qui s'échappent lors de la combustion.

La fumée de silice se présente généralement sous forme de particules sphériques de très petite taille dont le diamètre moyen est de l'ordre de 0,1 um et composées de silice amorphe (>85%). Ces particules sont essentiellement vitreuses, ce qui en fait un produit hautement pouzzolanique. Elles permettent aussi de compléter la granulométrie des ciments et ainsi d'améliorer la compacité du matériau durci et donc sa résistance mécanique.

- **Les Pouzzolanes**

Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement des substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires ayant une composition chimique et minéralogique appropriées. Elles sont essentiellement composées de silice, d'alumine et de fer, et développent naturellement des propriétés pouzzolanique. Les pouzzolanes artificielles correspondent à des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxydes de fer qui, activés thermiquement, développent des propriétés pouzzolanique (argiles ou schistes par exemple) [Sersale. 1980].

Les pouzzolanes ne durcissent pas elles-mêmes en présence d'eau, mais elles réagissent à température ambiante en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 libéré au cours de l'hydratation du clinker, pour former des CSH et des aluminates de calcium hydratés .

- **La perlite**

La perlite est une roche volcanique acide, vitreuse et hydratée, de couleur gris clair, verdâtre ou noirâtre, appartenant à la famille des rhyolites. Fréquemment, la roche présente un aspect lustré, avec un débit caractéristique en perles à structure concentrique en pelures d'ognon, mais elle peut également se présenter sous d'autres. Elle se distingue des autres verres naturels par une teneur en eau chimique de constitution de 2 à 6% dans la structure vitreuse [Berraih. 2010].

2.10.3. Activité pouzzolanique

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

L'activité pouzzolanique se caractérise par deux aspects distincts :

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

Les différents matériaux pouzzolanique décrits ci-dessus possèdent tous la propriété, selon la définition, de réagir avec l'hydroxyde de calcium, en présence d'humidité, pour former des composés possédant

des propriétés liantes. L'influence de la silice et de l'alumine ne peut pas être négligée, la silice participe dans le mélange par la fixation de la chaux et l'alumine augmente la résistance mécanique du matériau à court terme.

2.10.4. Différentes utilisations de la pouzzolane

Les pouzzolanes présentent diverses possibilités d'utilisation, les principaux domaines sont les suivants:

2. 10.4.1. L'agriculture

- La culture en plein champ

La pouzzolane est utilisée pour l'amendement de certains sols. Elle est riche en silice, en alcalino-terreux, offre pour certaines cultures l'avantage d'un milieu bien aéré, ainsi qu'un meilleur enracinement, un meilleur arrachage, la facilité de reprise des plantes, la réduction du risque de carences et de maladies.

- Horticulture

L'herbe pousse mal sur la pouzzolane, son caractère minéral met les toiles plastiques à l'abri des rayons ultraviolets pour la culture horticole en serre.

2. 10.4.2. Applications routières

Elle sert pour le sablage des routes verglacées. Utilisée comme couches de base pour itinéraires routiers hors-gel (la porosité globale de la pouzzolane empêche la formation de lentilles de glaces et évite donc la mise en place de barrières de dégel).

Dans les travaux publics, elle est utilisée comme matériaux de remblais légers, pour la réalisation de terrains de sport, piste d'athlétisme, amendement de terrains gazonnée.

2. 10.4.3. Dans l'industrie

La pouzzolane est utilisée dans la fabrication de ciment, de béton léger et les parpaings comme constituant secondaire (la structure alvéolaire de la pouzzolane confère une faible densité au béton pour une qualité mécanique donnée), les boisseaux de cheminées, les filtres divers et fosses septiques, sert aussi, comme éléments de décoration (actuellement les exploitants mettent l'accent sur cet aspect en mettant en avant la touche decouleur qu'apporte la pouzzolane).

2.11. CONCLUSION

L'utilisation des ajouts cimentaires dans l'industrie de fabrication des ciments sont de plus en plus

utilisés pour la confection des matériaux cimentaires (mortier et béton) pour plusieurs raisons, soit écologiques, soit économiques, soit pour améliorer certaines propriétés à l'état frais ou durci

Au terme de ce chapitre, nous pouvons retenir que les ajouts cimentaires pouzzolaniques sont caractérisés par une teneur élevée en dioxyde de silicium seul ou, en dioxyde de silicium et en oxyde d'aluminium combiné. Ils peuvent réagir avec la chaux hydratée (portlandite), libérée lors de l'hydratation du ciment Portland pour former des composés ayant des propriétés liantes. Ces hydrates, se nomment en tant que produits de la réaction pouzzolanique et sont très semblables aux produits issus de l'hydratation du ciment Portland.

CHAPITRE 3

CHAPITRE 3

SYNTHESE

BIBLIOGRAPHIQUE

SUR L'ETAT DE CONNAISSANCES DE PERLITE

DE PERLITE

CHAPITRE 3 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'ÉTAT DE CONNAISSANCES DE LA PERLITE

3.1. INTRODUCTION

Dans l'industrie cimentaire, la recherche d'un liant moins coûteux, en utilisant des déchets industriels et des ressources naturelles, est devenue une préoccupation majeure pour palier au déficit dans la fabrication du ciment Portland. L'Algérie est riche en gisements volcaniques, comme le gisement de pouzzolane naturelle de Béni Saf qui est employé comme ajout minéral actif dans les usines locales de fabrication du ciment. D'autres gisements des roches volcaniques vitreuses se trouvent au Nord-Ouest de l'Algérie, tel que la perlite de Hammam Boughrara.

La perlite est un aluminosilicate roche volcanique, en raison de sa nature vitreuse et de sa composition chimique (70-75% SiO_2 et 12-18% Al_2O_3) [Meral Ç., 2004][Rashad A. M.,2016]. Elle peut être utilisée comme ajout pouzzolanique [Yu L. H. et al., 2003][Meral Ç., 2004][Erdogan S. T. et Saglik A. Ü., 2013][Chihaoui R., 2018]. Il est très intéressant d'étudier cette roche comme apport en matière première pour l'utiliser comme ajout minéral actif.

Ce chapitre consiste en une synthèse de recherche sur les travaux effectués sur les mortiers à basse des ajouts pouzzolanique tel que la perlite et la pouzzolane. Nos résultats sont extrapolés sur ceux de l'étude du mémoire de Melle BOURROUBEY.CH [Bourroubey C. 2019], Dr CHIHAOUI [Chihaoui R., 2018] et Dr. HAMADACHE.M [Hamadache M, 2018].

Ces résultats présentés dans ce chapitre concernent les mortiers à base de différents pourcentages de perlite naturelle le mortier témoin caractérisant leur capacité d'absorption d'eau par les capillaires et ce après 1 jour et 7 jours de stockage des éprouvettes sur une fine couche d'eau.

Pour étudier l'influence du milieu de conservation des différents mortiers sur leur comportement mécanique, des essais de résistances compression et traction par flexion ont été menés aux échéances de 60 jours.

3.2. LA PERLITE

3.2.1. Définition

La perlite est un verre volcanique amorphe de nature acide, de la famille des rhyolites perlitiques, qui a une teneur en eau relativement élevée (2 à 6% d'eau combinée chimiquement), habituellement formée par l'hydratation d'obsidienne. Elle a la propriété inhabituelle de s'expanser lorsqu'elle est

chauffée entre 850°C et 1100°C. Cette expansion se traduit par une augmentation de volume 7 à 20 fois le volume initial [Jing Q. et al., 2011] [Denton J. S. et al., 2012][Gürtürk M. et al., 2013][Rashad A. M., 2016].

3.2.2. Caractéristiques physique, chimique et minéralogique de la perlite

Les différentes variétés de perlites se sont formées d'un même magma acide, fortement différencié, de nature essentiellement rhyolitique, plus rarement rhyodacitique. En ce qui concerne la texture des perlites, on admet qu'elle correspond au stade final du processus de formation, au moment où le magma s'est solidifié en roche. La composition chimique des différentes variétés de perlites est déterminée par les processus de différenciation ayant eu lieu dans le magma au cours de son ascension, tandis que leur composition minéralogique est conditionnée par la vitesse ascensionnelle du magma, les paramètres thermiques et les conditions de solidification de la roche.

La perlite moins hydratée ou moins perlitisée a une couleur noire et la perlite plus hydratée ou perlitisée prend la couleur grise avec la présence des perles en verre (Figure 3.1 Différents degrés de perlitisation).

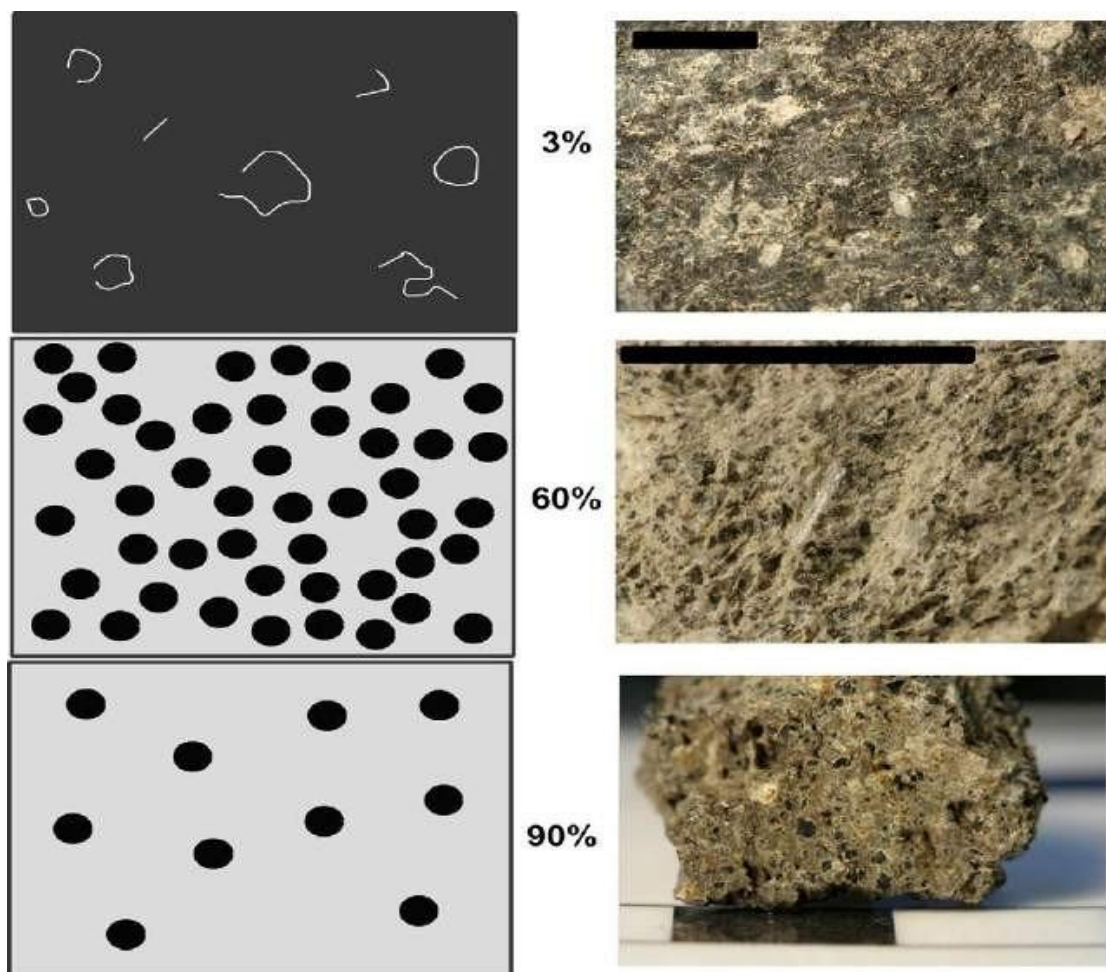


Figure 3.1 : Différents degrés de perlitisation [Ferk A. 2012]

Les plus importantes propriétés physiques de la perlite sont énumérées dans le tableau 3-1. (Propriétés physiques de la perlite brute)

Tableau 3.1. Propriétés physiques de la perlite brute. [Ferk A. 2012]

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)

Une série d'analyses chimiques de minerais de perlite prélevée dans plusieurs endroits du monde est donnée dans le tableau 3-2 (Analyses chimiques (% en masse) de perlite brute de divers pays.

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

Tableau 3.2. Analyses chimiques (% en masse) de perlite brute de divers pays [Ferk A. 2012]

3.2.3. La perlite en Algérie

La perlite existe dans les roches volcaniques et sédimentaires au Nord-Ouest algérien, exactement dans la localité de Hammam Bouhrara, près de Maghnia. La localisation de son gisement est montrée en annexe B sur la carte des potentialités minières, établie par l'Office National de Recherche Géologique et Minière.

Les perlites de Maghnia sont 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. Deux sites situés au Nord-Est de Maghnia sont reconnus comme gisement de la perlite (voir tableau 3-3. Les principaux gisements de la perlite de Maghnia). Ils forment des petits corps lenticulaires d'épaisseur 6 à 29 m et une longueur de 150 à 300 m (N° 93 et 94).

Tableau 3.3. Les principaux gisements de la perlite de Maghnia [Ferk A. 2012]

N° de gisement	Réserves ou paramètres estimatifs en tonnes	Conditions techniques et minières	Composition chimique (%) ou propriétés physico-mécaniques
93	Secteur principal: 142 500 Secteur Bab: 196 000 Secteur Roussel: 15 000	Favorables (Inexistence de roches de recouvrement)	SiO ₂ = 71,68 Al ₂ O ₃ = 12,69 Fe ₂ O ₃ = 1,34 CaO = 1,08 MgO = 0,55 K ₂ O = 3,91 Na ₂ O = 3,62 FeO = 0,49 SO ₃ = 0,08 P ₂ O ₅ = 0,05 PF = 3,53 (Perte aux feux %)
94	considérables	Favorables	SiO ₂ = 71,38 Al ₂ O ₃ = 14,25 Fe ₂ O ₃ = 2,19 CaO = 0,7 MgO = 0,35 K ₂ O = 3,30 Na ₂ O = 4,00 FeO = 1,15

3.2.4. Localisation du gisement de la perlite de Hammam Bouhrara

La perlite est extraite du gisement de Hammam Bouhrara situé à Tlemcen, Algérie. On trouve cette forme des roches volcanique siliceuse, la figure 3.2 représente localisation du gisement de Hammam Bouhrara à Tlemcen.

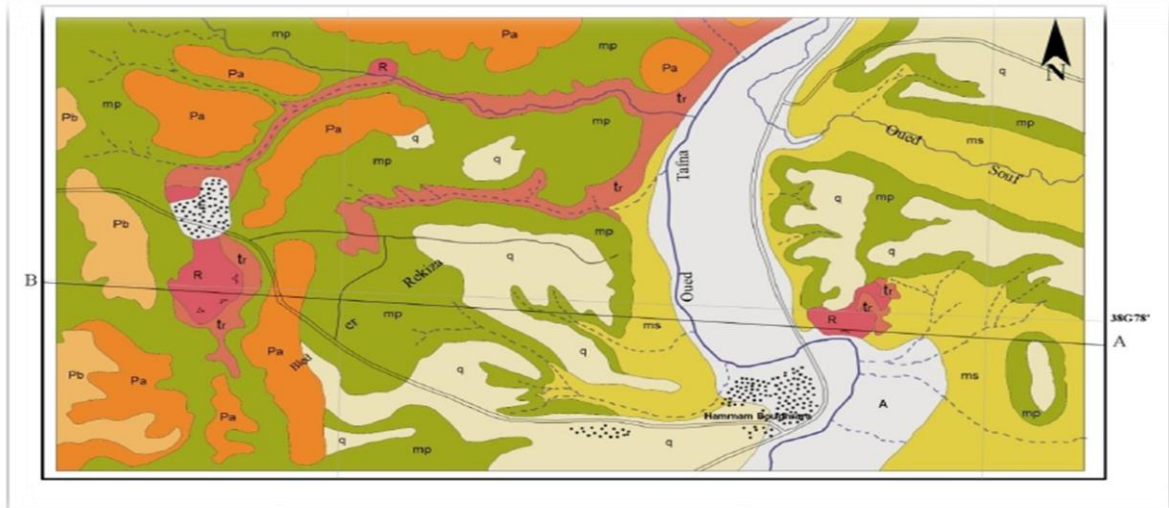


Figure 3.2 : Localisation du gisement de HammemBoughrara (TLEMCEM)
[Hamadache M, 2018]

La légende de cette carte est représentée dans la coupe verticale figure 3.3

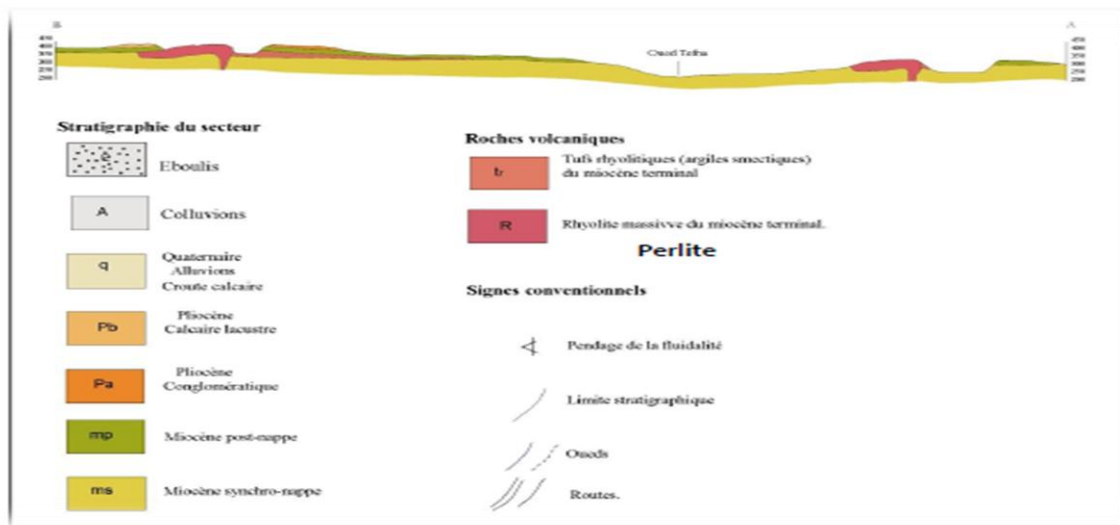


Figure 3.3 : Coupe verticale géologique du gisement de Hammam Boughrara
[Hamadache M, 2018].

3.3. RECHERCHES EFFECTUEES SUR LA PERLITE

3.3.1. Résultats de la maniabilité des mortiers à base de perlite

a) Selon la recherche Melle BOURROUBEY [Bourroubey C. 2019] elle a conclu que :

Selon la recherche de BOURROUBEY [Bourroubey C. 2019]elle a conclu que la maniabilité des mortiers diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par de la Perlite.

La figure 3.4 présente le temps d'écoulement en fonction du dosage en Perlite des mortiers.

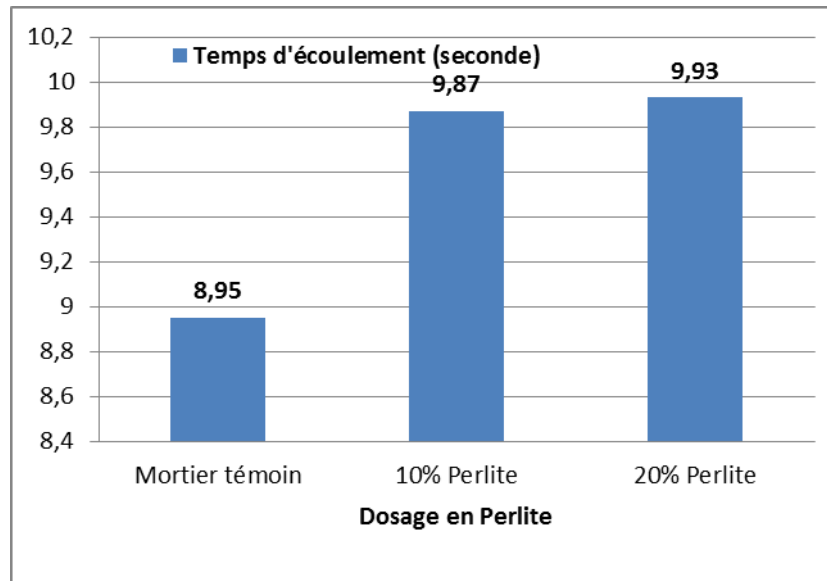


Figure 3.4 : Temps d'écoulement en fonction du dosage en Perlite des mortiers. [Bourroubey C. 2019]

Le tableau 3.3 présente les dosages du plastifiant des mortiers à base de Perlite.

Tableau 3.3 : Dosages du plastifiant des mortiers à base de Perlite. [Bourroubey C. 2019]

% de l'ajout en perlite	MT	Perlite10%	Perlite20%
Ciment (g)	450	430	409.1
Plastifiant %	0	0.42	1.70
Plastifiant (g)	0	1.8	7

L'augmentation du taux de la Perlite accroît sensiblement la demande en eau. La croissance de la demande en eau est principalement attribuée à l'augmentation progressive de la surface spécifique des liants pouzzolaniques.

b) Selon les recherches de Dr. HAMADACHE. [Chihaoui R, 2017] il a conclu que :

D'après les résultats d'essais d'étalement montrent que la quantité d'eau doit être augmentée pour que les mortiers incorporant la perlite naturelle puissent développer un étalement de $\pm 5\%$ de celui du mortier de ciment sans ajout. La demande en eau des mortiers augmente avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la perlite naturelle.

Tableau 3.4 : Proportions des mélanges de différents mortiers.[Chihaoui R, 2017].

Code	Liant	Sable/Liant	Eau/Liant	Étalement (%)
M0	100% PC	2.75	0.485	110
M5	95% PC+5% NPP	2.75	0.485	106
M10	90% PC+10% NPP	2.75	0.490	108
M15	85% PC+15% NPP	2.75	0.495	105
M20	80% PC+20% NPP	2.75	0.495	105

La croissance de la demande d'eau est principalement attribuée à l'augmentation progressive de la surface spécifique des liants incorporant la perlite naturelle.[Chihaoui R, 2017]

3.3.2. Résultats de l'essai d'absorption capillaire

La figure 3.5 représente les résultats obtenus de l'essai d'absorption capillaire des mortiers confectionnés avec 10% et 20 % de perlite et le mortier témoin.

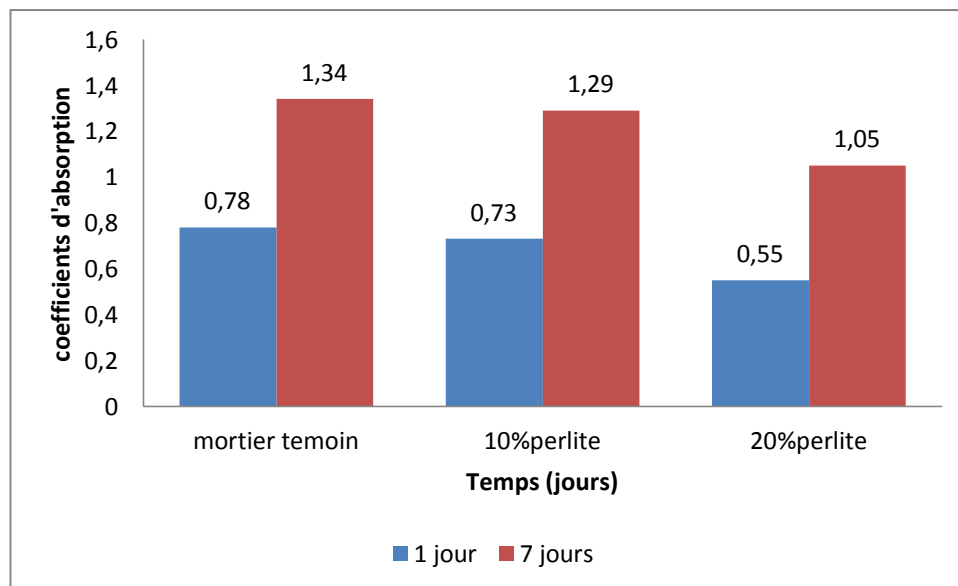


Figure 3.5: Evolution des coefficients d'absorption capillaire des différents mortiers.[Bourroubey C. 2019]

La figure 3.5 présente l'influence de la perlite naturelle sur l'absorption d'eau des mortiers à l'âge de un et 7 jours.

Les résultats montrent l'influence de la perlite naturelle sur l'absorption d'eau des mortiers à l'âge de 1 et 7 jours, on remarque : que 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 agrégats sont remplis par ces ajouts et les pores capillaires sont réduits.

3.3.3. Résistances mécaniques des mortiers

3.3.2. 1. Résistances à la traction

a) Selon la recherche Melle BOURROUBEY [Bourroubey C. 2019] elle a conclu que :

Les résultats des mesures des résistances à la traction ont été obtenus par rupture à la flexion trois points des éprouvettes ($4*4*16\text{cm}^3$) à base de 10 % et 20% de perlite et celles du mortier témoin.

Le tableau 3.3 et la figure 3.6 présentent les résultats des résistances à la traction en MPa en fonction du temps et du dosage en Perlite.

Tableau 3.53: Résistances à la traction (MPa).[Bourroubey C. 2019]

Jours	3	7	14	28	60
Mortier témoin	10.495	11.269	11.354	11.573	13.209
10% de Perlite	10.961	11.249	12.448	13.703	13.905
20% de Perlite	11.612	11,764	12.965	13.004	14.215

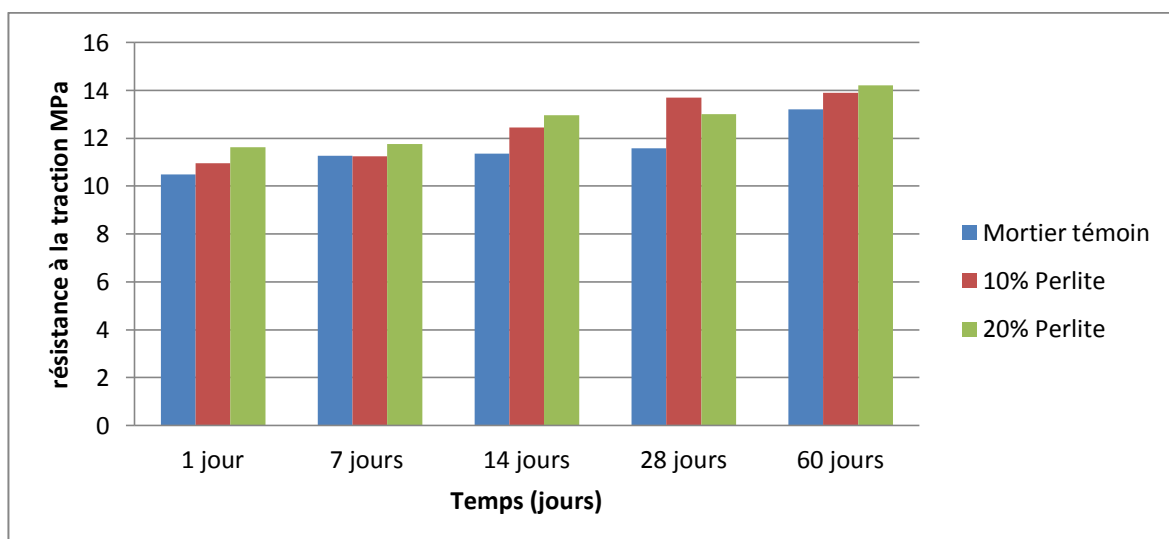


Figure 3.63: Evolution des résistances à la traction (MPa).[Bourroubey C. 2019]

La figure 3.6 montre l'influence de l'incorporation de la perlite sur la résistance à la traction des

mortiers à l'âge de 3, 7, 14, 28 et 60 jours. On constate que la résistance est supérieure par rapport du mortier témoin.

- 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.
- À long terme la résistance des mortiers à 20% perlite et supérieur à celle des mortiers à 10% de Perlite et au mortier de référence

b) Selon les recherche de Dr.HAMADACHE[Hamadache M. 2018] il a conclu que :

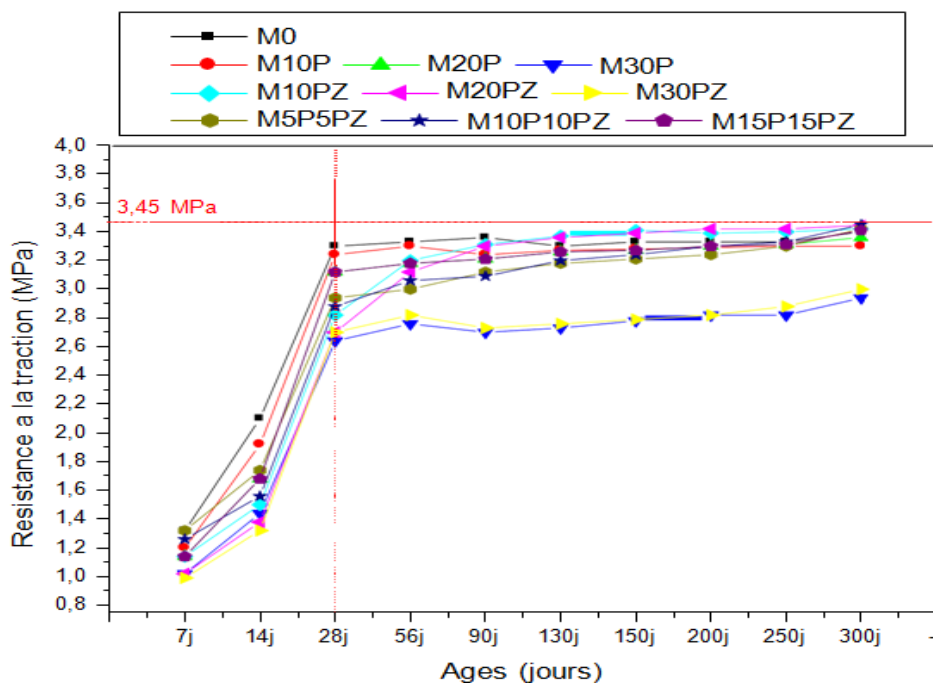


Figure 3.7. Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des mortiers dans l'eau saturée en chaux [Hamadache M. 2018]

Il a été démontré dans la figure 3.7 que la résistance à la traction de tous les mortiers augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute avant 28 jours, au-delà de 28 jours on constate qu'il y a une augmentation lente sauf qu'une chute résistance pour les mortiers avec 30% d'ajout de pouzzolane naturelle et de 30% d'ajout de la perlite.

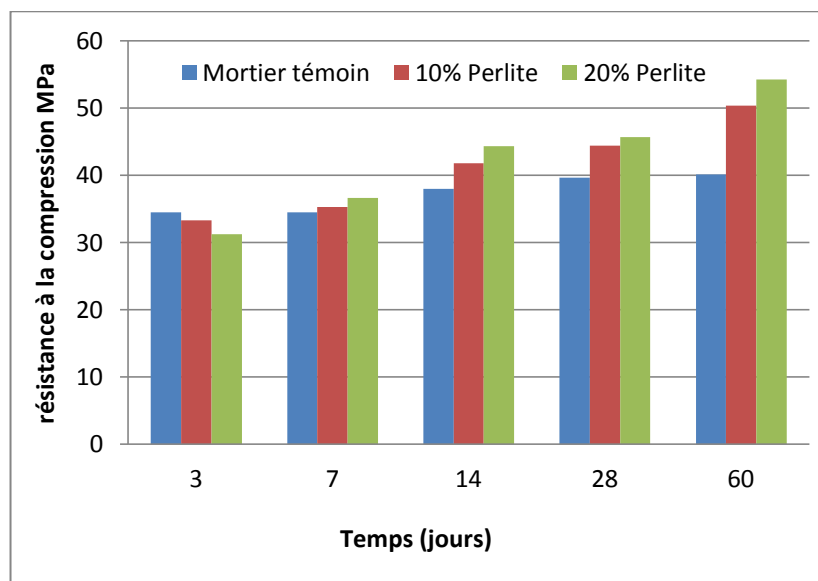
3.3.3. 2. Résistance à la compression des mortiers à base de perlite

a) Selon la recherche Melle BOURROUBEY [Bourroubey C. 2019] elle a conclu que :

Les résistances à la compression des mortiers à base de perlite sont reportées au tableau 3.6 et la figure 3.8.

Tableau 3.64: Résistances à la compression (MPa). [Bourroubey C. 2019]

Jours	3J	7J	14J	28J	60J
MORTIER TEMOIN	34.467	34,520	38.015	39.608	40.146
10% DE PERLITE	33,301	35,317	41,760	44.432	50.350
20% DE PERLITE	31,267	36,647	44,360	45.659	54.258

**Figure 3.84:** Evolution des résistances à la compression (MPa). [Bourroubey C. 2019]

L'analyse de la figure 3.8 permet d'apporter les commentaires suivants :

D'après la figure, nous remarquons que les résistances à la compression des mortiers élaborés avec les différents taux de substitution de la perlite sont inférieures à celle du mortier témoin et cela au très jeune âge (3 jours), deviennent comparable à 7 jours et surpassent celle du témoin à long terme (14, 28 et 60 jours).

Ce gain de résistance peut être attribué aux rôles complémentaires de l'effet filler de perlite et l'effet pouzzolanique de l'ajout 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** d'où une structure plus dense, plus compacte et par conséquent une pâte plus résistance.

b) Selon les recherche de Dr.HAMADACHE[Hamadache M. 2018] il a conclu que :

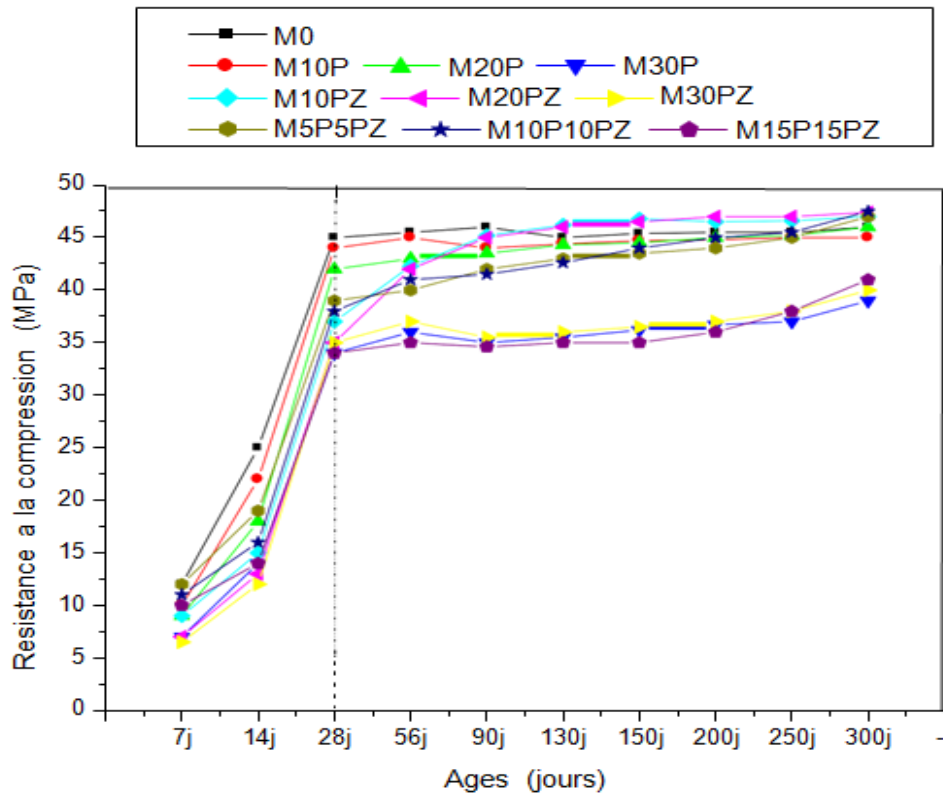


Figure 3.9. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers dans l'eau saturée en chaux. [Hamadache M. 2018]

Il démontrer que :

- Les résistances augmentent rapidement au jeune âge jusqu'à l'âge de 28 jours, après quoi ces résistances augmentent légèrement à long terme et ceux pour tous les mortiers.
- Les résistances à la compression diminuent en générale avec l'augmentation du pourcentage des ajouts pouzzolaniques.

On remarque que la résistance à la compression de tous les mortiers augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute.

La finesse d'un liant est un facteur important affectant le taux de développement de la résistance. L'augmentation de la finesse dans les limites acceptables peut améliorer le développement de la résistance au jeune âge, particulièrement si un ciment contient des ajouts minéraux.

3.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons évoqué les recherches effectuées sur les mortiers à base de perlite à l'état frais et durci.

L'analyse des résultats de la littérature indique bien que la perlite est un ajout minéral actif.

Lorsqu'elle est introduite dans le ciment, elle affecte les caractéristiques physico-mécaniques des mortiers étudiés. Cet effet varie d'une étude à une autre selon la composition chimique, la finesse du liant, le rapport E/C et l'utilisation ou non d'un adjuvant réducteur d'eau.

La substitution de 20 % du ciment par la perlite est le taux le plus intéressant qui s'avère optimal, puisque c'est le taux moyen qui a satisfait les critères d'amélioration de résistance et d'absorption capillaire, et offre une possibilité pour améliorer la durabilité des mortiers

L'ajout de perlite naturelle dans le ciment améliore à long terme la résistance mécanique du mortier grâce au déclenchement de l'effet pouzzolanique de la perlite, entre 7 et 28 jours de durcissement. [**Hamadache M.2018**] , [**Ferk A. 2012**]

PARTIE II
PARTIE II

MATERIAUX
**MATERIAUX
ET METHODES
EXPERIMENTALES**

CHAPITRE 1

MATERIAUX UTILISES

CHAPITRE 1 : MATERIAUX UTILISES

1.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous avons identifié et caractérisé les matériaux utilisés ; perlite, ciment, sable normalisé.

Le travail que nous présentons met en évidence perlite provenant de Maghnia dans le but de son exploitation en substitution partielle au ciment, il s'agit de comparer l'influence de cet ajout minéral sur différents mortiers incorporant ce matériau.

Nous avons effectué une série de tests dans les laboratoires suivants :

- **Laboratoire pédagogique de M.D.C département de génie civil et d'architecture (Université Abdelhamid Ibn Badis) Mostaganem.**
- **Laboratoire de recherche Construction Transport et Protection de l'environnement (LCTPE) USTOMB Oran.**

Les essais ont été réalisés sur des mortiers selon trois compositions différentes :

1. Un mortier témoin constitué de 100% de ciment
2. Un mortier avec 15 % de perlite en substitution au ciment.
3. Un mortier avec 25 % de perlite en substitution au ciment.

1.2. MATERIAUX UTILISES

1.2.1 Ciment

Le ciment utilisé dans tous les essais est un ciment Portland Composé CPJ-CEM II /A 42.5, obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts. Du sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.

Le ciment Portland composé CPJ-CEM II/A 42.5 est constitué de:

- 80 à 94% de clinker Portland.
- 6 à 20% maximum d'ajouts (calcaire pur).
- Constituants secondaires (0 à 5% sulfate de calcium comme régulateur de prise).

1.1.1.1. Caractéristique physique

Tableau 1.1 : caractéristique physique du ciment CPJ-CEM II/A 42.5[Bourroubey C. 2019].

Caractéristiques	Valeur
Masse Volumique Apparente (g/cm ³)	1.215
Masse volumique Absolue (g/cm ³)	3.150
Surface spécifique (BLAINE) (cm ² /g)	4000
Temps de début de prise (heures)	2h : 03
Temps de début de prise (heures)	3h : 00
La résistance à la compression à 28jours (MPA)	47

1.1.1.2. Composition chimique et minéralogique

Tableau 1.2 : Composition chimique du ciment CPJ-CEM II/A 42.5[Bourroubey C. 2019].

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl	K ₂ O	Na ₂ O	Chaux libre	Perte au feu	Résidu insoluble
20.34	5.37	3.00	61.69	1,80	2.20	0.027	0.76	0.14	0.97	5.03	1,12

➤ Domaine d'utilisation

- Béton courant (non armé ou faiblement armé: fondations, portées réduites, décoffrage différé).
- Produits préfabriqués en béton non armé (blocs, hourdis ...)
- Maçonnerie.
- Stabilisation des sols.
- Travaux en grande masse (barrages etc. ...) Béton routier.
- Béton fortement sollicité.

1.2.2. Perlite

La perlite utilisée « PR » est d'origine volcanique extraite du gisement de Hammam Boughrara situé à Maghniya[GhanounaF.2018].



Figure. 1-1: Gisement à Hammam Boughrara (Tlemcen)[Ghanouna F.2018].

Cette PR est extraite sous forme de roches de diamètres variant de 20 à 50 cm, de couleur grise, à l'aspect d'un verre avec des reflets argentés, elle réfléchit la lumière suivant certains plans internes et elle se fragmente en petites sphères ou perles d'où vient son nom « perlite » (figure 1-2-a).

Elle est concassée (figure 1-2-b) puis étuvée pendant 24 heures à une température de 80°C afin d'éliminer toute éventuelle humidité, ensuite broyée et tamisée à travers un tamis de 80 µm (figure 1-2-c). Le passant sera utilisé en substitution du ciment Portland.



Figure1-2: Perlite naturelle (a), concassée (b), broyée (c)

La composition chimique de la perlite, est obtenue par la méthode de fluorescence X en utilisant le spectromètre de fluorescence X du laboratoire de la cimenterie de Lafarge-Holcim (tableau II-3) [Chihaoui R. 2008].

Tableau 1.3 : Composition chimique élémentaire de la perlite naturelle[Chihaoui R. 2008]

CaO	SiO2	Al2O3	Fe2O3	SO3	K2O	Na2O	MgO	PAF
2,38	72,81	13,68	2,16	0,01	3,64	0,97	0,05	4,20

Les caractéristiques physiques de PR utilisée déterminées au laboratoire de la cimenterie de Lafarge-Holcim sont regroupées dans le tableau II-4. La figure II-1 montre le résultat d'analyse granulométrique par laser de PR.

Tableau 1-4: Caractéristiques physiques de Perlite[Chihaoui R. 2008].

Surface spécifique de Blaine (cm²/g)	4400
Masse volumique absolue (g/cm³)	2,41
Refus 45 µm (%)	12

1.2.3 Sable

Le sable utilisé est un sable normalisé, d'origine naturel, siliceux. Il est propre, les grains sont de forme isométrique et arrondie dont la teneur en silice est au moins égale à 98%. Son absorption en eau est inférieure à 0.2%(Fig 1.4).

Dans notre étude expérimentale, nous avons utilisé un sable siliceux de la société d'ADWAN Zone industrielle Fornaka Mostaganem (Fig1.3).



Fig. 1.3 : Zone industrielle Fornaka Mostaganem.



Fig. 1.4 : sable siliceux d'Adwan.

1.2.4. Eau de gâchage

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

1.2.5 Adjuvant

L'adjuvant employé est le PLASTIMENT® BV 40+ (voir annexe) est un plastifiant réducteur d'eau énergétique qui augmente la compacité du béton, entraînant ainsi une amélioration des résistances mécaniques et diminue l'absorption capillaire des bétons et augmente leur compacité surtout aux zones marnage, l'amélioration des résistances aux cycles gel-dégel, 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 .

1.3 . CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons identifié tous les matériaux (ciment, perlite, 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 mortiers. La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux.

CHAPITRE 2
CHAPITRE 2

METHODES
EXPERIMENTALES

2.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, les essais expérimentaux réalisés au cours de notre étude sont décrits. Ces essais sont relatifs à l'étude des propriétés des mortiers à base de 15 et 25 % de perlite ainsi qu'une formulation témoin pour le besoin de comparaison

Nous précisons également les différentes méthodes d'essais utilisés ainsi que leurs modes opératoires et les références de leurs normes correspondantes.

Pour remarque on n'a pas pu effectuer des essais sur pâtes de ciment à base de perlite (essais de consistance et de prise) et des écrasements sur mortiers pour les échéances 28 et 60 jours. Est-ce la cause des dispositions sanitaires préventives entretenues à l'encontre de la pandémie ont interdit l'accès au laboratoire et par conséquent rendu le travail expérimental impossible.

2.2. ESSAIS SUR MORTIERS A L'ETAT FRAIS

2.2.1. Formulations des mortiers

Le tableau 2.1 donne les composants et leurs dosages utilisés pour l'élaboration des mortiers avec et sans ajouts.

Tableau 2.1 : Formulations des mortiers.

Code	M0	M1	M2
E/C	0,5	0,5	0,5
Perlite /C (%)	0	0.1	0.23
Sable (g)	1350	1350	1350
Ciment (g)	450	418.8	399.8
Perlite (g)	0	62.82	100
Eau (g)	225	209.4	200
Vol. de la pâte (cm ³)	370,2	370,2	370,2

Avec :

- M0 : mortier témoin sans perlite
- M1 : mortier avec 15% de perlite
- M2 : mortier avec 25% de perlite

2.2.2. Maniabilité des mortiers

L'essai de maniabilité est caractérisé par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration (Figure 2.1)

2.2.2.1. Equipement utilisé :

La maniabilité du mortier frais est déterminée à l'aide du maniabilimètre(LCPC) (Figure 2.1)



Figure 2.1 : Maniabilimètre(LCPC) pour mortier.

L'appareil utilisé est schématisé sur la (Figure 2.1). Il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique (60cm×30cm×30cm), posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible.

2.2.2.2. 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 4 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 2.2). 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.

Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide.

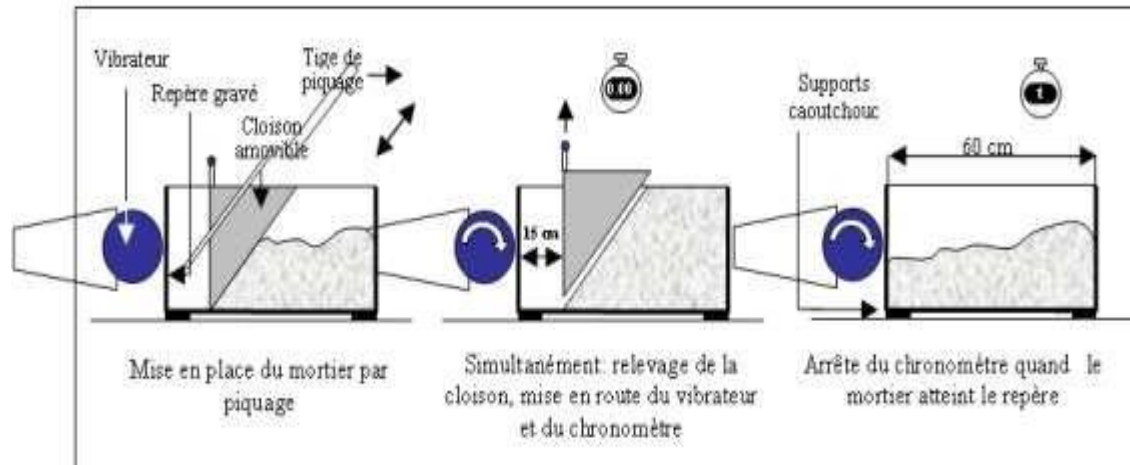


Figure 2.2 : procédure de l'essai de maniabilité.

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, d'où le nom de l'appareil comme illustré au tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Classe de consistance selon la durée d'écoulement [LA NORME EN 206-1].

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

2.2.2.3. Confection des mortiers :

Mélanger le sable normalisé avec le ciment (avec ou sans ajout) et l'eau dans les proportions données par le tableau 2.3.

Avant d'être utilisé pour l'identification de caractéristiques physique et/ou mécanique ce mortier est malaxé pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme

Introduire l'eau en premier (avec plastifiant pour mortier avec ajout) dans la cuve du malaxeur (Figure 2.3), y verser ensuite le ciment ; aussitôt après, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.



Figure 2.3 : Malaxeur automatique à mortier.

Après 30 s de malaxage introduire régulièrement le sable pendant les 30s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.

Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci. Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.

Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le tableau (2.3).

Tableau 2.3 : les opérations du malaxage de mortier [LA NORME EN 196-1].

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction de ciment		Introduction du sable		Raclage de la cuve		
Durée des opérations			30 s	30 s	30 s	15 s	1 min 15 s	60 s
Etat du malaxeur	Arrête		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrête		Vitesse rapide

2.3.3. Confection des éprouvettes

Le mortier prêt, le verser immédiatement dans des moules prismatiques 4x4x16 cm (sans plots pour les essais d'absorption capillaire ou munis de plots pour les mesures de retrait. La mise en place est réalisée par vibration

Introduire dans chacun des compartiments des moules une fraction du mortier en première couche à l'aide d'une spatule, et doit être bien tassé. Vibrer ces moules à l'aide d'une table vibratoire ensuite remplir la deuxième couche et vibrer encore à raison de **60 chocs** et puis araser le mortier avec une règle métallique.

Pour finir recouvrir les moules d'un film plastique pour éviter l'évaporation d'eau et mettre une étiquette sur les éprouvettes : date, nom du mortier (figure II.9). Les éprouvettes sont conservées dans une chambre humide régulée à 20°C et 90% d'humidité relative.



Figure 2.4 : Moule d'éprouvettes prismatiques (40x40x160)mm



Figure 2.5 : Aspect des éprouvettes après démoulage

Après 24 heures, on fait le démoulage et on conserve les éprouvettes à température ambiante pour les préparer à l'essai d'absorption capillaire (figure II.10)

2.3. ESSAIS SUR MORTIERS A L'ETAT DURCI

2.3.1. Essais d'absorption capillaire

Principe L'essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de mortier, dans des conditions spécifiées.

2.3.1.1. Appareillage

- Une balance d'une précision de 0,1 g;
- Un récipient de 200 mm de haut, assez grand pour contenir 12 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 (40×40×160) mm conformes à l'EN 196-1;

2.3.1.2. Mode opératoire

La norme EN196-1 décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai.

Avec le mortier normal préparé, on remplit un moule 4x4x16. 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.

- Peser les éprouvettes après 7 jours, puis les placer verticalement dans un récipient rempli d'eau à niveau constant. (*figure 2.6*)
- 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.



Figure 2.6: Eprouvettes dans le récipient en position verticale avec un niveau d'eau constant 3mm.

- Après 1 jours, sortir les éprouvettes du récipient, les essuyer légèrement avec un papier ou un chiffon sec afin d'éliminer l'eau excédentaire, puis les peser (M1) 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 M7 (figure2.7)



Figure 2.7 : la pesée des éprouvettes.

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

$$C = \frac{M_o - M_j}{16}$$

Où :

M_0 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 gramme.

2.3.2. Détermination de l'indice d'activité Pouzzolanique

L'indice d'activité, noté i , est défini comme le rapport des résistances en compression $f_p(t)$ et $f_0(t)$, respectivement la résistance du mortier contenant une fraction p d'addition et la résistance du mortier témoin (sans addition).

Au sens des normes EN 450 et NFP 18- 506, cet indice est déterminé pour $E/C = 0.5$ et $p = 0,25$.

$$i(p) = \frac{f_p(t)}{f_0(t)}$$

Des prismes de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ doivent être confectionnés pour les deux mortiers respectivement à base de ciment et à base de liant équivalent afin de mesurer les résistances en compression sur les demi-épreuves à 28 jours.

2.4.3. Essais de résistances mécaniques

2.4.3.1. Objectif de l'essai

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

2.4.3.2. 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.

2.4.3.3. Équipement nécessaire (norme EN196-1)

- Un malaxeur normalisé.
- Des moules normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ et de longueur 16 cm
- Une machine d'essai de résistance à la flexion et à la compression (figure 2.8) permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 kN avec une vitesse de mise en charge de $50 \text{ N/s} \pm 10 \text{ N/s}$ à $2400 \text{ N/s} \pm 200 \text{ N/s}$. La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion (figure 2.9).

2.4.3.4. Conduite del'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

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 \pm 1°C jusqu'au moment de l'essai de rupture.



Figure 2.8 : la machine de résistance mécanique

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure suivant :

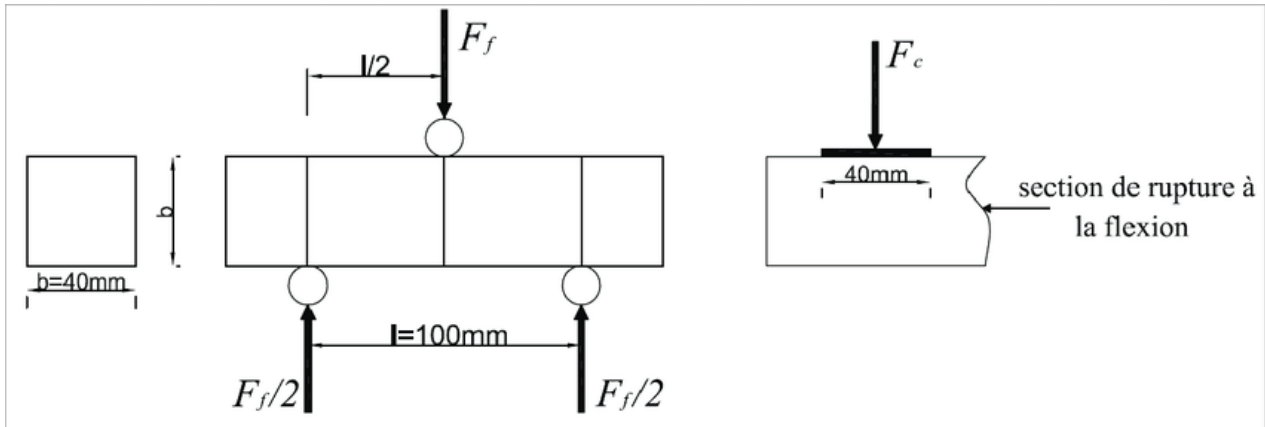


Figure 2.9 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion



Figure 2.10 : l'état des résultats après l'essai de résistance à la flexion.

Si F_f est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut $F_f \cdot l / 4$ et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$R_f = \frac{1.5F_f}{b^3}$$

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) vaut :

$$R_f = 2.34 \times 10^{-3} F_f$$

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiqué sur *la figure II.15*. Si F_c est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra :

$$R_c = \frac{F_c}{B^2}$$

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si F_c est exprimée en newtons, cette résistance exprimée en mégapascals vaut :

$$R_c = \frac{F_c(N)}{1600}$$

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.

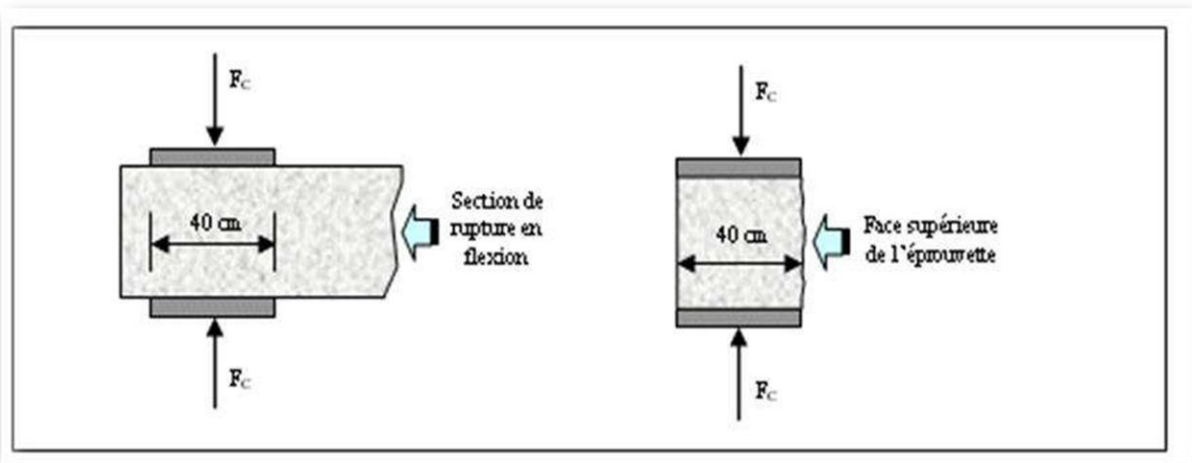


Figure 2.11: Dispositif de rupture en compression.



Figure 2.12 : l'état des éprouvettes après la compression.

Lorsque le résultat est satisfaisant, la moyenne ainsi obtenue est la résistance du ciment à l'âge considéré.

2.5. CONCLUSION

Dans le but de caractériser les différentes formulations des mortiers utilisées, 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 mortiers étudiés. La procédure expérimentale concernant l'essai d'absorption capillaire consiste à peser des éprouvettes de mortier après un et sept jours de contact avec l'eau, et celle de résistance mécanique des mortiers confectionnés à base de perlite de la région de Maghnia

Nous avons adopté pour toutes les formulations le même rapport Eau/Ciment et un même volume de pâte.

PARTIE III
PARTIE III

RESULTATS ET
DISCUSSIONS

CHAPITRE 1
CHAPITRE 1
RESULTATS
DES ESSAIS
A L'ETAT FRAIS

CHAPITRE1 : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT DURCI

1.1 INTRODUCTION

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des différents essais de caractérisation à l'état frais effectués sur les mortiers confectionnés selon les différentes combinaisons d'ajouts de perlite (0%, 15% et 25%). Il s'agit des essais de maniabilité sur les mortiers.

1.2 MANIABILITE

Les tests de caractérisation de la maniabilité sont menés dès la sortie du malaxeur, avant le moulage des corps d'épreuve. Le tableau 3.1 présente les différents mortiers étudiés, le rapport E/C utilisé lors de la confection de ces mélanges ainsi que les maniabilités obtenues. En guise de référence, la maniabilité obtenue, mesurée à l'aide d'un maniabilimètre (LCL) sur un mortier témoin confectionné est d'environ 8.95 s.

Afin d'obtenir une maniabilité voisine de celle d'un mortier témoin pour comparer entre les autres mortiers, nous avons maintenu le rapport E/C constant, égal à 0,5.

Tableau 3.1: la maniabilité des mortiers (temps de vibration en secondes)

Nomination	E/C	Temps de maniabilité (sec)
Mortier Témoin (0%)	0.5	8.95
Mortier avec (15%)	0.5	9.7
Mortier avec (25%)	0.5	9.6

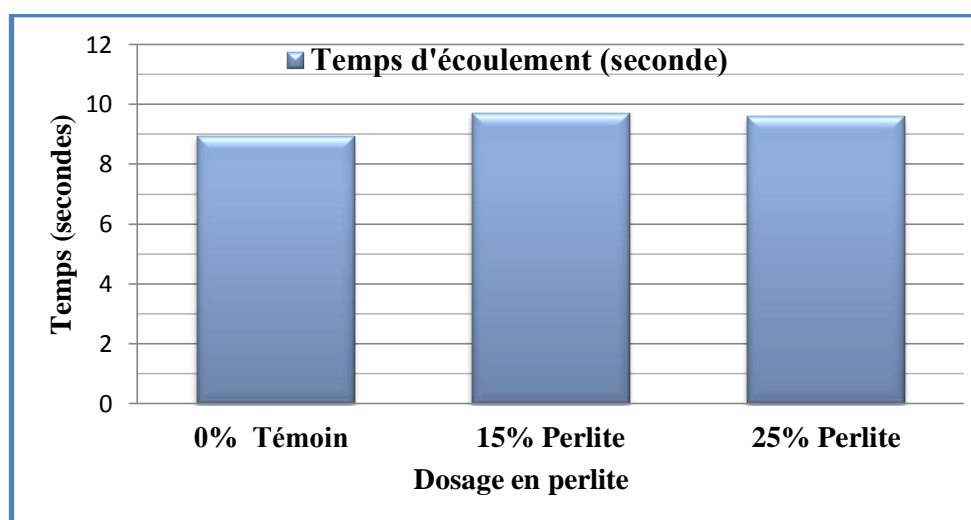


Figure 3.2 : Temps d'écoulement en fonction du dosage en Perlite des mortiers.

- Les dosages du plastifiant introduit sont donnés par le tableau 3.2:

Tableau 3.2 : Dosages du plastifiant des mortiers à base de Perlite.

% de l'ajout en perlite	Témoin 0%	Perlite 15%	Perlite 25%
Ciment (g)	450	418.8	399.8
Plastifiant %	0	0.4	1.2
Plastifiant (g)	0	1.68	4.8

La maniabilité des mortiers diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par de la Perlite. Pour garder une maniabilité plus ou moins constante, il a fallu augmenter la quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'un mélange maniable et ouvrable.

Cela prouve que l'augmentation du taux de la Perlite accroît sensiblement la demande en eau. La croissance de la demande en eau est principalement attribuée à l'augmentation progressive de la surface spécifique des liants pouzzolaniques.

1.3. CONCLUSION

Les essais menés à l'état frais sur mortiers avaient pour objectif la détermination des valeurs des rapports E/L par l'essai de maniabilité qui a révélé que la présence de la perlite implique une augmentation du besoin de la quantité d'eau.

Les résultats des mesures de maniabilité des différents mortiers ont montré que l'incorporation d'ajout en particulier la perlite affecte légèrement sur la maniabilité des mortiers frais.

Enfin, nous avons ajusté les quantités d'adjuvant pour avoir environ la même maniabilité pour tous les mortiers.

CHAPITRE 2
CHAPITRE 2

RESULTATS
DES ESSAIS
A L'ETAT DURCI

CHAPITRE 2 : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT DURCI

2.1. INTRODUCTION

Les résultats présentés dans ce chapitre concernent les mortiers à base de différents pourcentages de perlite naturelle le mortier témoin caractérisant leur capacité d'absorption d'eau par les capillaires et ce après 1 jour et 7 jours de stockage des éprouvettes sur une fine couche d'eau.

Pour étudier l'influence du milieu de conservation des différents mortiers sur leur comportement mécanique, des essais de résistances compression et traction par flexion ont été menés aux échéances de 14 jours.

Nous remarquons que les échéances des essais sont arrêtées à 14 jours, dus à la pandémie du covid-19 qui a rendu le travail expérimental dans le laboratoire impossible.

2.2. RESULTATS DE L'ESSAI D'ABSORPTION CAPILLAIRE

Les résultats obtenus à chaque échéance sur trois éprouvettes de chaque mortier sont exprimés sous forme de la moyenne des trois valeurs mesurées.

Les résultats obtenus de l'essai d'absorption capillaire des mortiers confectionnés avec 15% et 25 % de perlite et le mortier témoin.

$$C = \frac{M_j - M_0}{16}$$

On utilise la formule suivante pour calculer l'absorption capillaire :

Exemple pour le mortier 15% perlite :

La moyenne de 3 pesées des échantillons, $M_0 = 558\text{g}$

Après 1 jours, la moyenne des 3 échantillons $M_1 = 566\text{g}$

Après 7 jours, la moyenne des 3 échantillons $M_7 = 575\text{g}$

Donc :

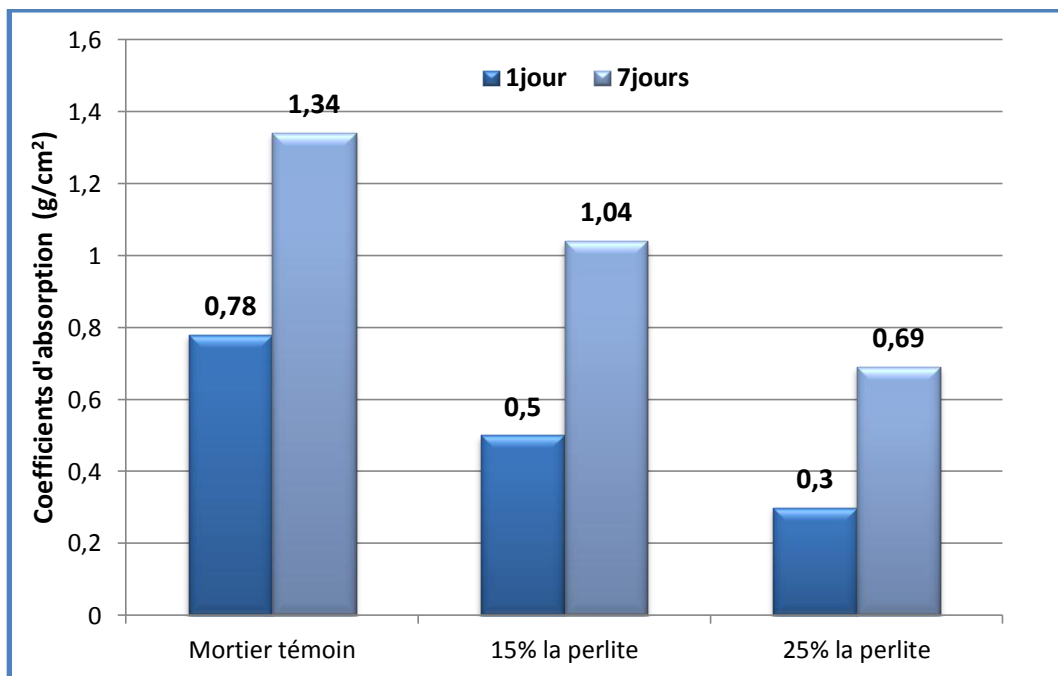
$$C = \frac{575 - 558}{16} = 1.04 \text{ g/cm}^2$$

Tableau 3.1 : Masses de différentes éprouvettes de mortiers en grammes

Mortiers		M0	M1	M7
15%perlite	1	560	569	577
	2	558	566	575
	3	556	563	572
25%perlite	1	560	565	575
	2	562	567	573
	3	559	565	577

Tableau3.2 : Coefficients d'absorption capillaire

Les différents mortiers	Absorption capillaire (g/cm ²)	
	1 jour	7 jours
Mortier témoin[Bourroubey C. 2019]	0.78	1.34
15 % la perlite	0.50	1.04
25 % la perlite	0.3	0.69

**Figure 3.1:** Evolution des coefficients d'absorption capillaire des différents mortiers.

La figure 3.1 présente l'influence de la perlite naturelle sur l'absorption d'eau des mortiers à l'âge de 1 et 7 jours.

- Après un jour, nous avons remarqué que le mortier témoin absorbe un peu plus d'eau que les autres mortiers.
- A 7 jours d'essai, tous les mortiers continuent leur ascension dans l'absorption d'eau, seulement les mortiers à **25%** sont très avantageux. Cela est dû au fait que les pores dans la pâte durcie et les interfaces entre cette dernière et les grains de sable sont remplis par la perlite et les pores capillaires sont ainsi réduits.
- Les résultats montrent l'influence de la perlite naturelle sur l'absorption d'eau des mortiers à l'âge de 1 et 7 jours, on remarque : que l'incorporation de la perlite à des taux de 15 et 25 % respectivement au ciment CPJ est très avantageuse puisqu'elle permet une réduction importante d'absorption capillaire. Les pores dans la pâte durcie et les interfaces entre cette dernière et les agrégats sont remplis par ces ajouts et les pores capillaires sont réduits.

2.3. RESISTANCES MECANIQUES DES MORTIERS

2.3.1. Résistances à la traction des mortiers à base de perlite

Les résultats des mesures des résistances à la traction ont été obtenus par rupture à la flexion trois points des éprouvettes ($4*4*16\text{cm}^3$) à base de 15 % et 25% de perlite et celles du mortier témoin.

Le tableau 3.3 et la figure 3.2 présentent les résultats des résistances à la traction en MPa en fonction du temps et du dosage en Perlite

Tableau 3.3 : Résistances à la traction par flexion (MPa).

Jours	3	7	14
Mortier témoin	10.495	11.269	11.354
15% de Perlite	10.774	11.656	12.717
25% de Perlite	10.903	12.353	11.081

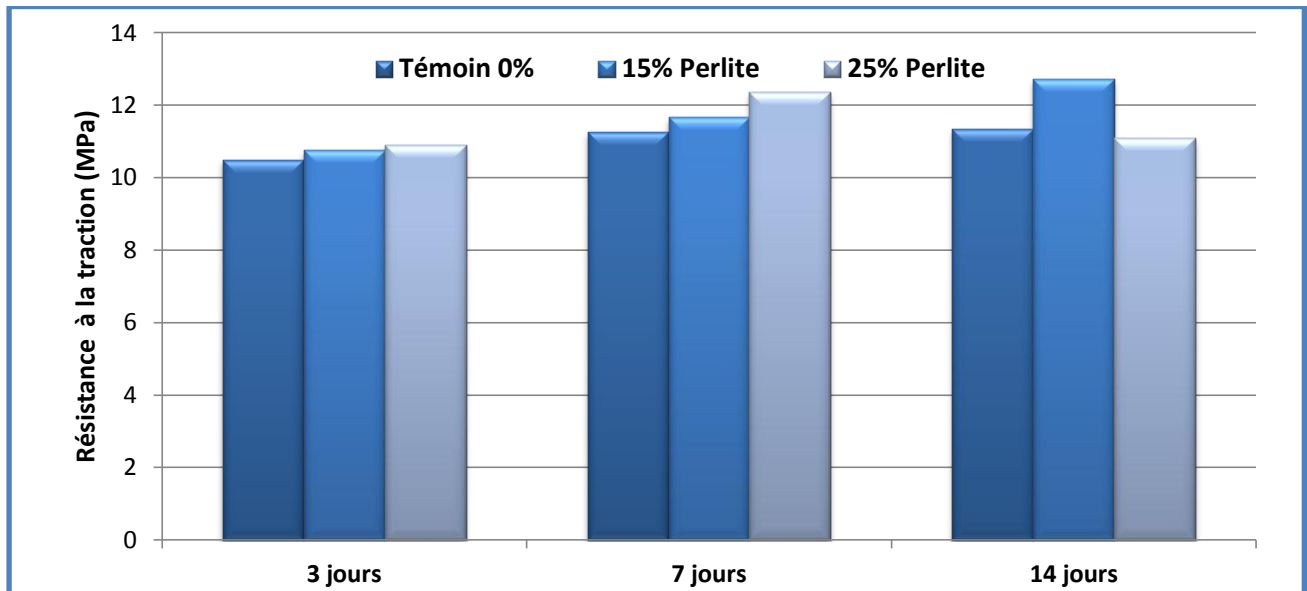


Figure 3.2 : Evolution des résistances à la traction (MPa).

La figure 3.2 montre l'influence de l'incorporation de la perlite sur la résistance à la traction des mortiers à l'âge de 3, 7, 14 jours. On constate que la résistance est supérieure par rapport du mortier témoin.

- La résistance à la flexion augmente avec l'augmentation du pourcentage en perlite à l'âge 3, 7 jours .
- A 14 jours le mortier à 15% de perlite affiche des résistances supérieures à celles des autres mortiers.
- Selon les recherches de Dr.HAMADACHE[Hamadache M, 2018]il a conclu une augmentation lente au-delà de 28 jours pour les mortiers avec 10 et 20% d'ajout de la perlite.

2.3.2. Résistance à la compression des mortiers à base de perlite

Les résistances à la compression des mortiers à base de perlite sont reportées au tableau 3.4 et la figure 3.3.

Tableau 3.4 : Résistances à la compression (MPa).

Jours	3J	7J	14J
MORTIER TEMOIN	24.467	34,520	38.015
15% DE PERLITE	23.365	30.573	35.752
25% DE PERLITE	22.785	34.656	35.293

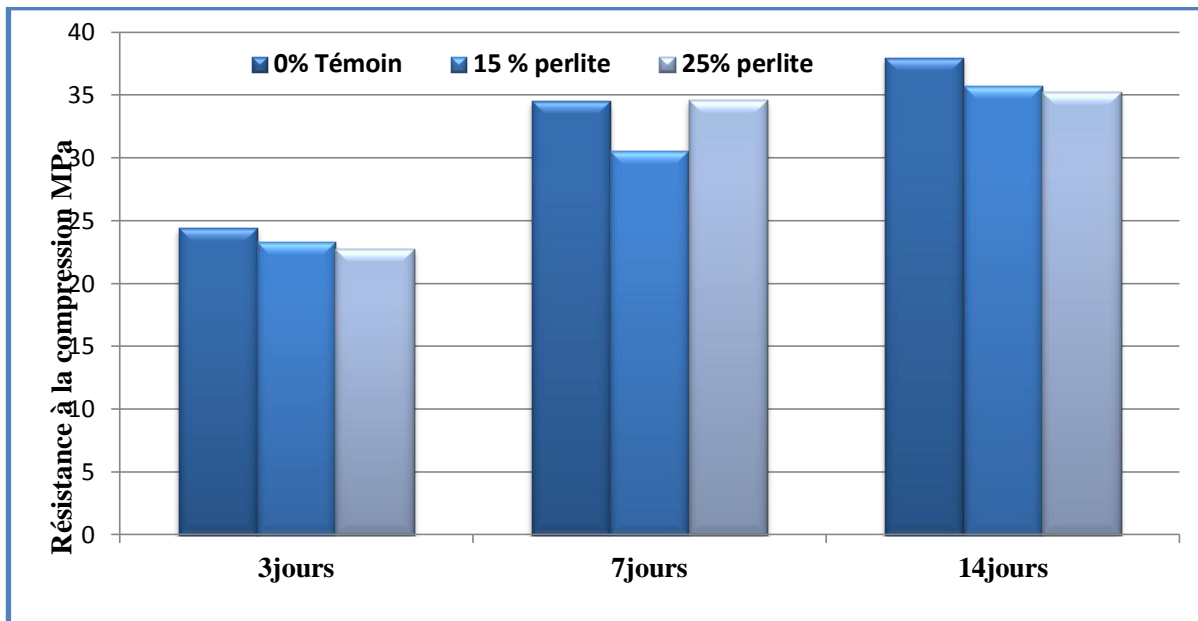


Figure 3.3 : Evolution des résistances à la compression (MPa).

L'analyse de la figure 3.3 permet d'apporter les commentaires suivants :

D'après la figure, nous remarquons que les résistances à la compression des mortiers à base de 15 et 25% de la perlite sont inférieures à celle du mortier témoin et cela au très jeune et à jeune âge (3, 7 et 14 jours), deviennent comparable à 7 jours pour le mortier à 25% de perlite par rapport au mortier témoin.

D'après les recherches de Dr.HAMADACHE[Hamadache M, 2018]à montrer que les résistances augmentent légèrement à long terme et ceux pour les mortiers à base de 10, 20 et 30% de perlite.

Ce gain de résistance peut être attribué aux rôles complémentaires de l'effet filler de perlite et l'effet pouzzolanique de l'ajout 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 d'où une structure plus dense, plus compacte et par conséquent une pâte plusrésistance.

2.4. CONCLUSION

Ce chapitre avait pour objective de comparer les résistances mécanique des mortiers à base de perlite naturelle de Maghnia, et le mortier témoin, et de comparer l'effet de l'incorporation de la perlite avec des différents pourcentages par rapport à un mortier témoin, sur l'absorption capillaire.

Les résultats menés à travers cette étude permettent de dégager que la substitution d'un ciment composé par un taux de 25% de perlite améliore les résistances mécaniques (flexion et compression) Pour l'absorption capillaire, le mortier témoin à absorbé une quantité d'eau importante par rapport au mortier à base de 15,25 % da perlite. Cela est dû au remplissage des pores capillaires de la matrice cimentaire par la perlite et les sont ainsi réduites

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La présente étude, est une contribution, d'une part, aux travaux de recherche sur les nouvelles sources d'approvisionnement en ajouts et en matières premières, et d'autre part sur la des matériaux naturels locaux utilisés dans la fabrication du ciment.

Ce travail expérimental a pour objectif d'étudier les avantages et la possibilité de substitution partielle du ciment par les ajouts pouzzolaniques (perlite naturelle de Maghnia) (15% et 25%) sur les caractéristiques physico-mécaniques des mortiers. Malheureusement, la pandémie du covid-19 que traverse le pays a obligé l'état à prendre des restrictions et préventions sanitaires ce qui a rendu le travail expérimental dans le laboratoire du département de génie civil et d'architecture impossible. C'est pour cette raison on n'a pas pu finalisés tous les échéances des essais mécaniques sur mortiers (28 et 60 jours), ainsi que les essais de consistance et prise des pâtes de ciment.

Les principales conclusions auxquelles nous sommes parvenues sont :

- ✓ les mortiers à base de 15 et 25% de la perlite sont inférieures à celle du mortier témoin et cela au très jeune et à jeune âge (3, 7 et 14 jours) de durcissement.
- ✓ D'après les recherches on montrer que les résistances augmentent légèrement à long terme et ceux pour les mortiers à base de 20% de perlite, puisque c'est le taux moyen qui a satisfait les critères d'amélioration de résistance et d'absorption capillaire, et offre une possibilité pour améliorer la durabilité des mortiers.
- ✓ Pour l'absorption capillaire, le mortier témoin à absorbé une quantité d'eau importante par rapport au mortier à base de 15 et 25 % de perlite, dû au remplissage des pores capillaires de la matrice cimentaire par la perlite et les sont ainsi réduites

Enfin, ce travail de thèse nous a donc permis de formuler des liants à base de substitution du ciment par de la perlite naturelle de Maghnia avec un taux allant de 15 et 25%, qui ont tout de même l'avantage d'atteindre des performances acceptables du point de vue de la résistance à la compression et l'absorption capillaire.

Perspectives

La perlite naturelle de Maghnia est un matériau méconnu par les différents acteurs de l'industrie cimentière ou de la construction. A partir de ce constat et suite à notre travail, on peut envisager de nombreuses perspectives de recherche, ce qui vise à mieux comprendre les effets de l'ajout de perlite naturelle dans le ciment sur les performances physiques et mécaniques des matériaux cimentaires dans les domaines suivants:

- L'influence de l'augmentation de la finesse de l'ajout.
- Etude de l'effet des ajouts sur la prise et consistance.
- Elaborer des mortiers binaires avec différents pourcentages d'ajouts en substitution
- Elargir l'étude du mortier à base de perlite.

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
REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUE

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

Aichouba A., Ghrici M., Benaissa A., 2005 : « 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.

Belhocine A., Nagoudi N., 2014 : « Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux », mémoire master en génie civil, université Kasdi Merbah- Ouargla, année 2013/2014.

Bouglada M., 2008 : « Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier », Thèse de Magister, UNIVERSITE DE M'SILA 2007/2008.

Bresson A., 2006 : « Influence de la minéralogie sur le comportement des mortiers de ciment au jeune âge », Mémoire de maître ès sciences (M.S.C), Université Laval, Québec, Canada.

Edwin Clarence Eckel, *Portland cement materials and industry in the United States*, Govt. print off., 1913, 401 p

Bessenouci.2010 Bessenouci Mohammed Zakaria « Impact et contribution thermo énergétique des matériaux de construction à base pouzzolanique dans l'habitat » Mémoire de magister, 2010

Amaury Cudeville, « Recycler le béton [archive] », Pour la Science, octobre 2011, p. 17-18.

Pailhere, A. M. (1982) Les adjuvants. Chapitre 4 de l'ouvrage "le Béton hydraulique" (Baron, Sauterey). Presse de l'ENPPC pp 99- 113

Cement Association of Canada 2005

Notes De Cours « les ajouts cimentaires » université Sherbrooke G.I.C 712 chapitre 7, 3-8P.2006

Supplementary cementing materials. Gouvermment of Canada Plan 2000 on climate changes. 2005

Chihaoui. 2008. Chihaoui Ramdane : « Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif » (Mémoire de Magister- USTMB d'Oran -2008).

Berraih. 2010. BERRAIH MIMOUN: « Etude des mortiers contenant de la pouzzolane naturelle et des déchets de verre » (Mémoire de Magister- l'ENSET d'Oran-2010).

Senhadji. 2006. YASSINE SENHADJI : « L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfatiques) » (Mémoire de Magister USTMB d'Oran -2006)

Norme Algérienne. 2000. NORME ALGERIENNE : « Liants hydrauliques - ciments courants : composition, spécifications et critères de conformité », NA 442 : 2000, Deuxième Edditions, IANOR

Sersale. 1980. R.SERSALE : « Structure et caractérisation des pouzzolanes et des cendres volantes ». Sous thème IV-1.7ème Congrès International de la chimie des ciments. Vol I. Paris, 1980.

Hamadache M.2018 Hamadache M., « Résistances mécaniques, conductivités résistance à la

corrosion des mortiers pouzzolaniques »,diplome de doctorat en sciences ,ENP Oran , (2018).

Ferk A. 2012. Ferk A., Leonhardt R., Denton J., Tuffen H., Hess K.U., Dingwell D.B. (2012) : « Paleointensity on volcanic glass of varying hydration states»

Djubo Y., 2007 : « effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les propriétés de ciments gépolyinérés a base scories volcanique».

Erdem., 1997 : « Effect of various additives on the hydration of perlite gypsum plaster and perlite-portland cement pastes», Turk J Chem1997;21(3):209–14.

Louis Joseph Vicat, Traité pratique et théorique de la composition des mortiers, ciments et gangues a pouzzolanes et de leur emploi dans toutes sortes de travaux

Ghrici M., 2006 : « 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.

Guenanou F., 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.

Guide De Prescription De Ciments Pour Des Constructions Durables : cas des bétons coulés en place. Collection Cimbeton T14.

Hamadache M., 2015 : « Non-destructive Testing for the Evaluation of Pozzolanic Mortar reinforced to corrosion » , Advanced Materials Research, Vol. 1064 (2015) pp 42-48 (2015) Trans Tech Publications, 10.4028/www.scientific.net/AMR.1064.42

J. Baron – Jp. Olivier Et J.C.Weiss., 1997 : « Les ciments courants » - « Les bétons, bases et données pour leur formulation » - Edition Eyrolles – 806p-1997.

Lerm., 2008 : «Au cœur du ciment », Direction Recherche & Innovation, Lerm (Arles) Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux, CBPC (N° 889, février-mars).

Lsunma., 1999 : Livret des substances utiles non métalliques de la Wilaya de Tlemcen.Edition du service géologique d'Algérie.

Manuel De Prevention De La Pollution Dans Le Secteur Du Ciment., 2008 : Centre d'activités régionales pour la production propre (CAR/PP) /Plan d'action pour la Méditerranée. Étude publiée en mai 2008.

Kedjour N., 2003 : « Le laboratoire du béton». Office des Publications

Senhadji Y., 2013 : « 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.

Bourroubey Chahrazed « influence de la perlite naturelle sur les mortiers ».Mémoire de fin d'étude de master académique, juin 2019.

NORME NF EN 196-1 : les opérations du malaxage

NORME NF EN 196-3 : Mesure de temps de début et fin de prise.

NORME NF EN 206-1 : Classe de consistance selon la durée d'écoulement.

NORME NFP 18-555 : La masse volumique absolue du ciment et perlite

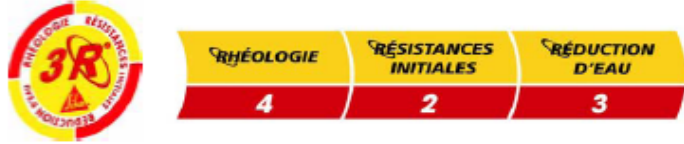
LES ANNEXES

Notice technique
Edition Janvier 2012
Notice n°1.19
Version n° 01.2012
SIKAPLAST® BV 40 +

SIKAPLAST® BV 40 +

Plastifiant/Réducteur d'Eau pour hautes résistances mécaniques.

Conforme à la norme NF EN 934-2 tab. 1 et 2

Présentation	SIKAPLAST® BV 40 + est un plastifiant réducteur d'eau pour haute résistance mécanique non chloré et prêt à l'emploi, à base de polycarboxylates modifiés, qui se présente sous la forme d'un liquide marron.
Domaines d'application	<p>SIKAPLAST® BV 40 + permet d'obtenir des bétons plastiques ayant de fortes résistances mécaniques à court et à long terme.</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ bétons à hautes performances, ■ bétons précontraints, ■ bétons préfabriqués étuvés, ■ bétons avec des granulats concassés, ■ bétons retarder en surdosage. <p>Pour les bétons étanches, le SIKAPLAST® BV 40 + diminue l'absorption capillaire des bétons et augmente leur compacité. Il permet donc de réduire la pénétration de l'eau et peut être utilisé dans les cas suivants: bétons enterrés, réservoirs, piscines, etc</p> <p>A dosage élevé, le SIKAPLAST® BV 40 + augmente le temps de prise du béton. La température jouant un rôle important, il est bon de procéder à des essais.</p> <p>Le SIKAPLAST® BV 40 + est compatible avec nos entraîneurs d'air SIKA AER et SIKA AER5. Cette combinaison conduit à :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 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 mamage.
Caractères généraux	<p>SIKAPLAST® BV 40+ est un plastifiant réducteur d'eau à haute performance qui confère au béton les propriétés suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ haute réduction d'eau, ■ maintien prolongé de la rhéologie, ■ robustesse vis-à-vis de la ségrégation, ■ bel aspect de parement au décoffrage. <p>CLASSIFICATION 3R</p>  <p>Le diagramme de classification 3R est composé de trois sections horizontales. La première section, intitulée 'RHÉOLOGIE', est marquée d'un '4' sur un fond rouge. La deuxième section, intitulée 'RÉSISTANCES INITIALES', est marquée d'un '2' sur un fond rouge. La troisième section, intitulée 'RÉDUCTION D'EAU', est marquée d'un '3' sur un fond rouge. À gauche de ces sections se trouve un logo circulaire '3R' avec 'RHÉOLOGIE' en haut, 'RÉSISTANCES INITIALES' à droite et 'RÉDUCTION D'EAU' en bas.</p>
Caractéristiques	
Aspect	Liquide marron
Conditionnement	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bidon de 5 kg ■ Bidon de 10 kg ■ Fût de 220 kg ■ Cubitenaire de 1000 kg



Stockage	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. Le produit peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.
Conservation	Un an dans son emballage d'origine intact
Données techniques	
densité	1,040 ± 0,015
pH	4,7 ± 1
Teneur en ions Cl⁻	≤ 0,1 %
Teneur en Na₂O Eq.	≤ 0,5 %
Extrait sec	11.5 ± 1,5 %
Conditions d'application	
Dosage	Plage d'utilisation recommandée : 0,3 à 1,5 % du poids de liant selon les performances recherchées. Dosage usuel du SIKAPLAST®BV40 + : 0,3 % à 1 %.
Mise en œuvre	SIKAPLAST® BV 40 + est ajouté, soit, en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
Précautions d'emploi	En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau.

Mentions légales	Produit réservé à un usage strictement professionnel. Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile. «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKAPLAST®, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKAPLAST® a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos recommandations. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»
-------------------------	--



Sika El Djazair
08 route de l'Arbaa, 16111 Eucalyptus
Alger/ ALGERIE
Web : dza.sika.com

Tel.: 213 (0) 21 50 21 84
213 (0) 21 50 16 92 à 95
Fax: 213 (0) 21 50 22 08

