



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie



N° d'ordre : /GC /2019

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN MASTER

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structure

Thème

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

Présenté par :

1. BOURROUBEY CHAHRAZED

Soutenu le 11/07 / 2019 devant le jury composé de :

Président : Mr BELHOUARI FETHI

Examinatrice : Mme BELAS NADIA

Encadrant : Mr BELARIBI OMAR

Année Universitaire : 2018 / 2019

SOMMAIRE.....	i
---------------	---

Table des illustrations

LISTE DES FIGURES.....	vi
------------------------	----

LISTE DES TABLEAUX.....	ix
-------------------------	----

NOMENCLATURE	xi
--------------------	----

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------------	---

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR LE CIMENT PORTLAND

1.1. INTRODUCTION.....	3
1.2. HISTORIQUE.....	3
1.3. LIANT HYDRAULIQUE : CIMENT.....	3
1.4. LES ETAPES DE FABRICATION DU CIMENT.....	4
1.4.1. Préparation de la matière première.....	4
1.4.2. Préparation du cru.....	4
1.4.3. Le séchage et le broyage.....	5
1.4.4. La cuisson ou calcination.....	5
1.4.5. Le broyage du ciment.....	5
1.5. LES CONSTITUANTS DU CIMENT.....	6
1.5.1. Le clinker.....	6
1.5.1.1 Broyabilité du clinker.....	8
1.5.1.2. Qualité du clinker.....	8

1.5.1.3. Principales Catégories De Ciments.....	8
1.5.1.4 calcul de la composition minéralogique du clinker.....	9
1.5.2. Le gypse (CaSO ₄)	10
1.5.3. Les ajouts minéraux.....	10
1.6. HYDRATATION.....	10
1.7. CINETIQUE ET CHALEUR D'HYDRATATION.....	11
1.8. PROPRIETES TECHNIQUES DU CIMENT PORTLAND.....	13
1.9. CONCLUSION.....	14

CHAPITRE 2 : LES CIMENTS AVEC AJOUTS

2.1. INTRODUCTION.....	15
2.2. COMPORTEMENT D'UN CIMENT AVEC AJOUT MINERAL.....	15
2.3. CLASSIFICATION DES AJOUTS MINERAUX.....	16
2.4. PRINCIPAUX AJOUTS MINERAUX INERTES.....	16
2.4.1. Fillers calcaires.....	16
2.4.2. Sable de dune.....	17
2.5. LES AJOUTS MINERAUX ACTIFS.....	17
2.5.1. La pouzzolane.....	17
2.5.2. La fumée de silice.....	18
2.5.3. Le laitier de haut fourneau.....	18
2.5.4. Les cendres volantes.....	19
2.5. L'INTERET DE L'UTILISATION DES AJOUTS MINERAUX DANS LE GENIE CIVIL.....	20
2.5.1. Intérêt du point de vue technique.....	20
2.5.2. Intérêt du point de vue économique.....	21
2.5.3. Intérêt du point de vue environnemental.....	21
2.6. LES INCONVENIENTS D'UTILISATION DES AJOUTS MINERAUX	21

2.7. EFFETS DES AJOUTS SUR LES PROPRIETES DES BETONS.....	21
2.7.1. Amélioration de l'ouvrabilité.....	21
2.7.2. Chaleur d'hydratation.....	22
2.7.3. Durabilité.....	22
2.7.4. Développement des résistances.....	22
2.7.5. Développement des bétons à haute résistance.....	22
2.8. L'UTILISATION DES AJOUTS EN ALGERIE.....	23
2.9. CONCLUSION.....	23

CHAPITRE 3 : RECHERCHES EFFECTUEES SUR LA PERLITE

3.1. INTRODUCTION.....	24
3.2. CARACTERISTIQUES PHYSIQUE, CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE DE LA PERLITE.....	24
3.3. LA PERLITE EN ALGERIE.....	27
3.3.1. La production de la perlite en Algérie.....	27
3.3.2. Localisation du gisement de la perlite de Hammam Boughrara.....	28
3.3.4. ETUDE DES MATERIAUX CIMENTAIRES A BASE DE LA PERLITE.....	29
3.3.4.1. Etudes à l'état frais.....	29
3.3.4.1.1. Résultats des essais de consistance.....	29
3.3.4.1.2. Résultats des essais de prise.....	31
3.3.4.1.3. Résultats de l'essai de maniabilité.....	32
3.3.4.2. Etude à l'état durci (Essais mécaniques).....	33
3.4. CONCLUSION.....	35

PARTIE II : METHODES EXPERIMENTALES

CHAPITRE 1 : MATERIAUX UTILISES

1.1. INTRODUCTION.....	37
1.2. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES.....	38
1.2.1. Le ciment.....	38
1.2.1.1. Caractéristique physique.....	38
1.2.1.2. Composition chimique et minéralogique.....	39
1.2.2. Perlite naturelle.....	40
1.2.2.1. Caractéristique chimique.....	41
1.2.2.2. Caractéristique physique.....	41
1.2.3. Le sable.....	41
1.2.3.1. Analyse chimique du sable.....	42
1.2.4. Eau de gâchage.....	42
1.2.5. Adjuvant.....	43
1.3. CONCLUSION.....	43

CHAPITRE 2 : METHODES EXPERIMENTALES

2.1. INTRODUCTION.....	44
2.2. ESSAIS SUR PATES NORMALISEES.....	46
2.2.1. Essai de consistance.....	46
2.2.2. Mesure des temps de début et fin de prise de la pâte.....	48
2.3. ESSAIS SUR MORTIERS A L'ETAT FRAIS.....	49
2.3.1. Formulations des mortiers.....	49
2.3.2. Maniabilité des mortiers.....	50
2.3.3. Confection des mortiers.....	51
2.3.4. Confection des éprouvettes.....	52

2.4. ESSAIS SUR MORTIERS A L'ETAT DURCI.....	53
2.4.1. Essais d'absorption capillaire	53
2.4.2. Détermination de l'indice d'activité Pouzzolanique.....	55
2.4.3. Essais de résistances mécaniques.....	56
2.5. CONCLUSION.....	60

PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE 1 : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT FRAIS

1.1. INTRODUCTION.....	61
1.2. RESULTAT DES ESSAIS DE CONSISTANCES.....	62
1.3. ESSAI DE PRISE.....	62
1.4. MANIABILITE.....	64
1.5. CONCLUSION.....	65

CHAPITRE 2: RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT DURCI

2.1. INTRODUCTION.....	66
2.2. RESULTATS DE L'ESSAI D'ABSORPTION CAPILLAIRE.....	66
2.3. RESISTANCES MECANQUES DES MORTIERS.....	68
2.3.1. Détermination de l'indice d'activité pouzzolanique.....	68
2.3.2. Résistances à la traction.....	68
2.3.3. Résistance à la compression des mortiers à base de perlite.....	69
2.4. Conclusion.....	71
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	72
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	74



PARTIE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE



CHAPITRE 1



***GENERALITES SUR LE CIMENT
PORTLAND***

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE CIMENT PORTLAND

1.1. INTRODUCTION

Le ciment est la partie « noble » du béton, au sens où c'est son développement qui a rendu possible la construction en béton. Il constitue aussi, dans la plupart des bétons, le poste le plus coûteux. Son rôle est en fait celui d'une « colle à cailloux ».

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.

1.3. LIANT HYDRAULIQUE : CIMENT

Un liant hydraulique est un mélange de poudre très fine 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 . Son mélange avec l'eau forme une pâte qui durcit progressivement dans le temps. Les constituants du ciment sont obtenus par une cuisson à haute température d'un mélange artificiel parfaitement dosé et homogénéisé.

1.4. LES ETAPES DE FABRICATION DU CIMENT

Le procédé de fabrication du ciment est un processus industriel dans lequel de grandes quantités de matières premières sont transformés en produits commerciaux tels que le clinker ou le ciment.

La figure 1.1 montre les étapes de fabrication du ciment :

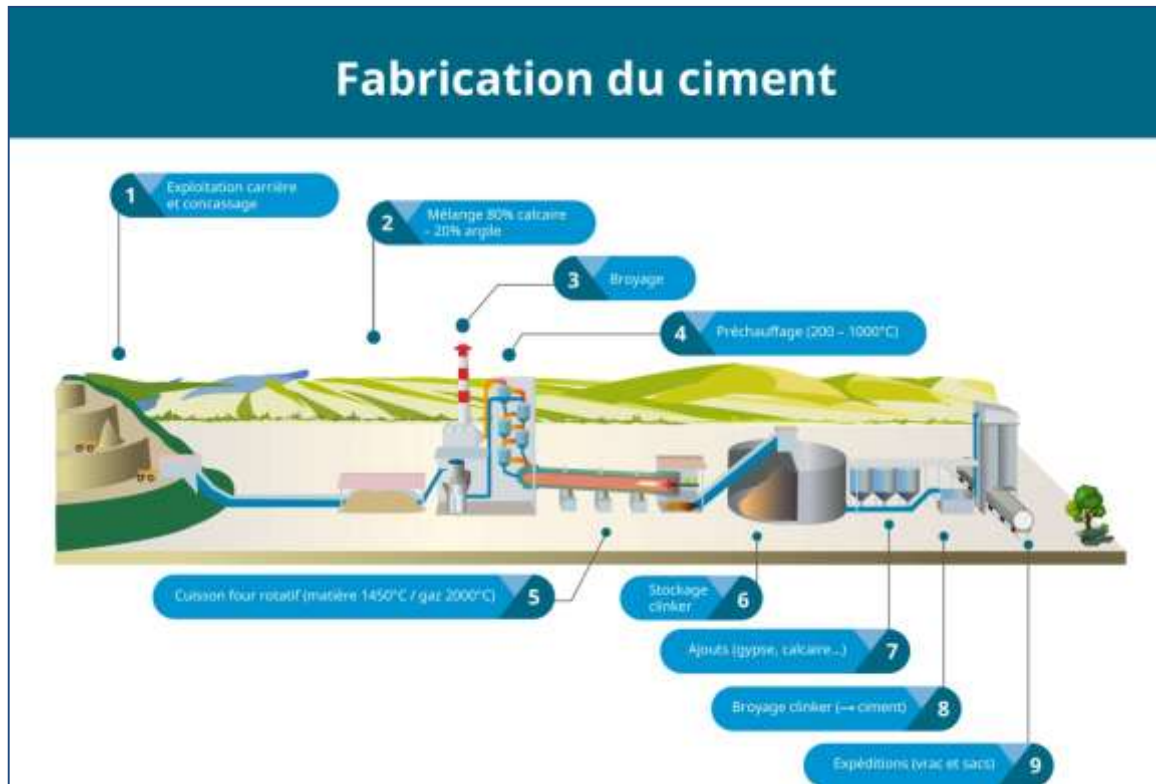


Figure I.1 : Stades de fabrication du ciment [Lafargeholcim].

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 ; Cimenton 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].

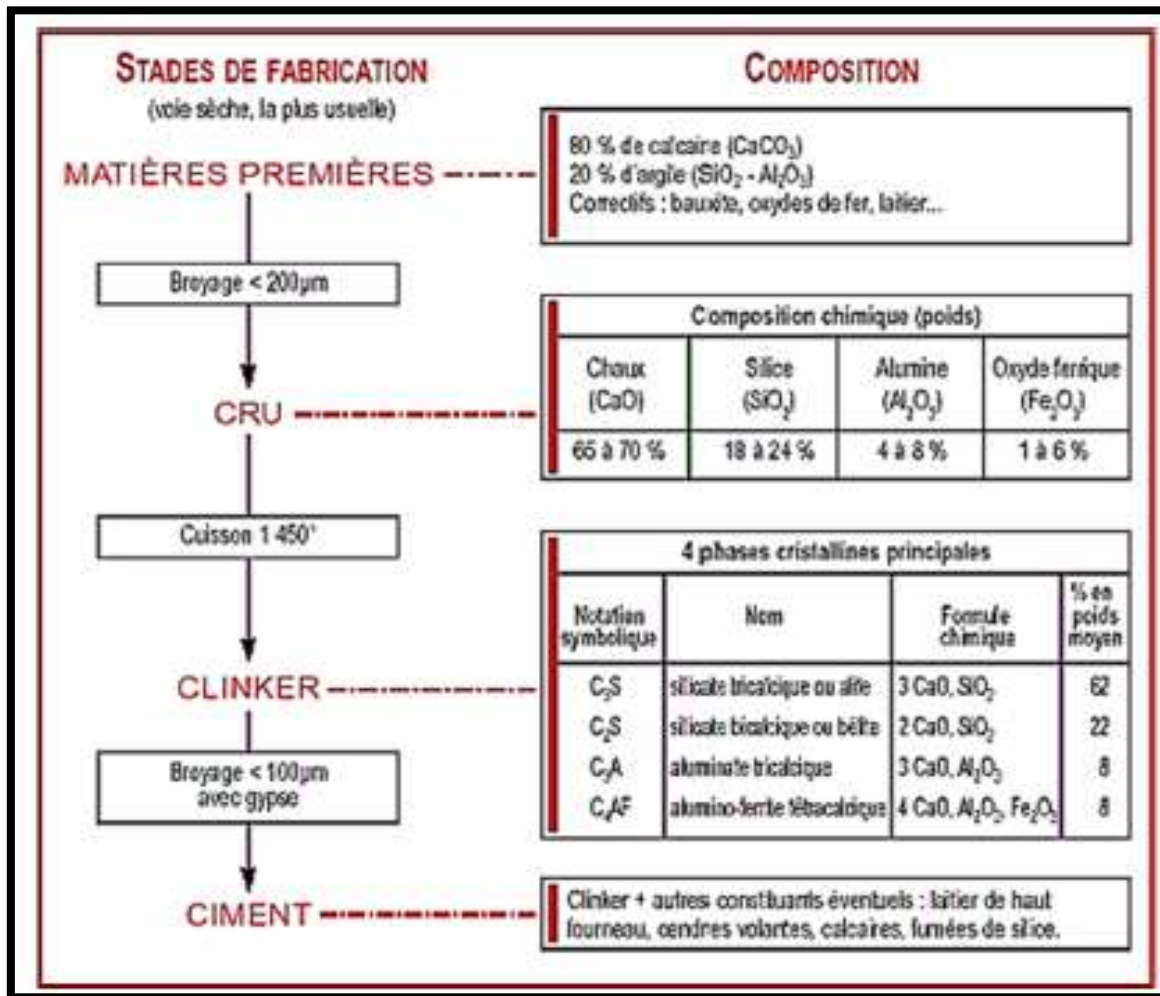


Figure 1.2 : les étapes de fabrication du ciment [Cimbeton, 1997].

1.5. LES CONSTITUANTS DU CIMENT

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. La figure I.3 montre le clinker dans sa phase cristalline.

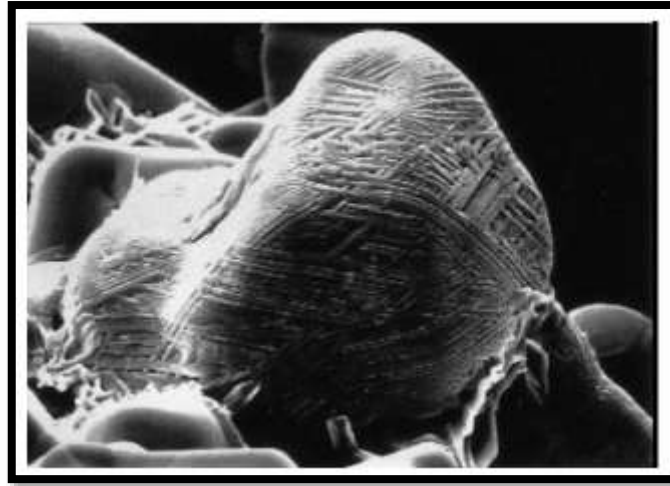


Figure I.3 : Cristaux anhydres du clinker [Bouglada, 2008].

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 (figure I.4).

- Silicate tricalcique, Ca_3SiO_5 ou $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$: C_3S ;
- Silicate bicalcique, Ca_2SiO_4 ou $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$: C_2S ;
- Aluminate tricalcique, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ou $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$: C_3A ;
- Aluminoferrite tetracalcique, $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_{10}\text{Fe}_2$ ou $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$: C_4AF ;
- Sulfate de calcium, CaSO_4 .

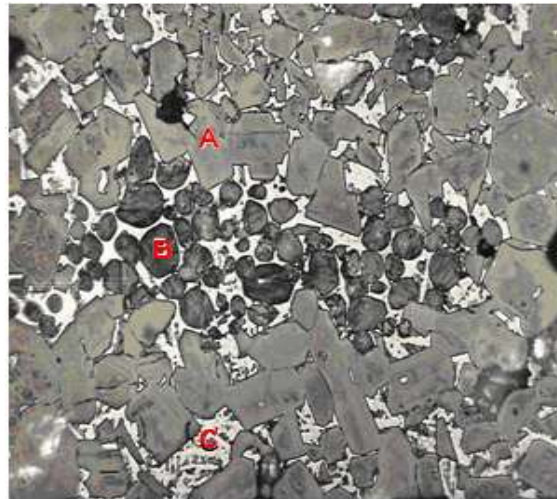


Figure I.4 : Clinker de ciment Portland [Ollivier et al, 2008].

A = cristaux polygonaux de C_3S ou alite ; B = cristaux arrondis de C_2S ou bélite ; C = phase interstitielle, liquide à la température de cuisson, formée de C_3A en microcristaux (gris) enchevêtrés avec C_4AF (blanc réfléchissant). Microscopie optique en lumière réfléchie [Ollivier et al, 2008].

Les compositions chimiques et minéralogiques du clinker sont comprises dans les limites données par le (tableau I.1) :

Tableau 1.1 : 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

1.5.1.1 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 certains chercheurs, plus le rapport $[(C3S + C2S) / (C3A + C4AF)]$ est élevé, plus facile est la broyabilité [Makhlouf, 2000].

1.5.1.2. Qualité du clinker

Dans la fabrication du ciment, une bonne préparation (mélange) est calculée pour avoir un rapport (rapport de saturation en chaux) m proche de 1 [Makhlouf, 2000].

$$m = \frac{CaO}{(2.8 SiO_2 + 1.18 Al_2O_3 + 0.65 Fe_2O_3)}$$

Si $m=1$ toute la chaux est consommée. L'art du cimentier consiste à se rapprocher au maximum de cette valeur. Mais en réalité on prend une quantité de quelques pourcents inférieures à ces valeurs.

1.5.1.3. Principales Catégories De Ciments [Cimbeton T14]

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par la norme NF P15-301.

- CEM I. Ciment portland (CPA - dans la notation française),
- CEM II. Ciment portland composé (CPJ),
- CEM III. Ciment de haut fourneau (CHF),
- CEM IV. Ciment pouzzolanique (CPZ),
- CEM V. Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

Tableau I.2 : 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 correspondantes 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).

1.5.1.4 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**

$$C_4AF = 3,04. Fe_2O_3$$

$$C_3A = 2,65. Al_2O_3 - 1,69. Fe_2O_3$$

$C_2S = 8, 6. SiO_2 + 1, 08. Fe_2O_3 + 5, 07. Al_2O_3 - 3, 07. CaO$

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

1.5.2. 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 (C_3A) 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'hydroaluminat tricalcique et produit un sel insoluble l'hydrosulfoaluminat de calcium ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$). [**Cimbeton T14**]

La quantité à introduire doit correspondre à la teneur en C_3A 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

L'hydratation du ciment met en jeu un nombre important de réactions chimiques complexes. Toutes ces réactions conduisent à la formation de silicates ou d'aluminates calciques hydratés qui font prise et qui donnent les propriétés mécaniques des pâtes de ciment (ciment + eau), des mortiers (ciment + eau + sable) et des bétons (ciment + eau + fins et gros granulats).

L'hydratation regroupe l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent entre le ciment et l'eau. Ces réactions d'hydratation sont très complexes et débutent dès la mise en contact de ces deux phases.

Les réactions d'hydratation des constituants anhydres du ciment mettent en jeu dès le contact avec l'eau, des réactions chimiques complexes qui se poursuivent dans le temps à des vitesses différentes en donnant naissance à des silicates et des aluminates de calcium hydratés qui sont insolubles dans l'eau et de la chaux hydratée (portlandite), d'où le phénomène de prise conduisant à de bonnes résistances mécaniques du ciment. L'emploi du gypse joue le rôle de

retardateur de prise pour les aluminates, en donnant naissance à une couche protectrice sur les grains, ce qui retarde l'hydratation.

La figure 1.5 montre des hydrates formés dans une pâte de ciment une semaine après gâchage avec un rapport eau/ciment = 0,5 (micrographie au microscope électronique à balayage, MEB sur fracture fraîche) [Lerm, 2008].

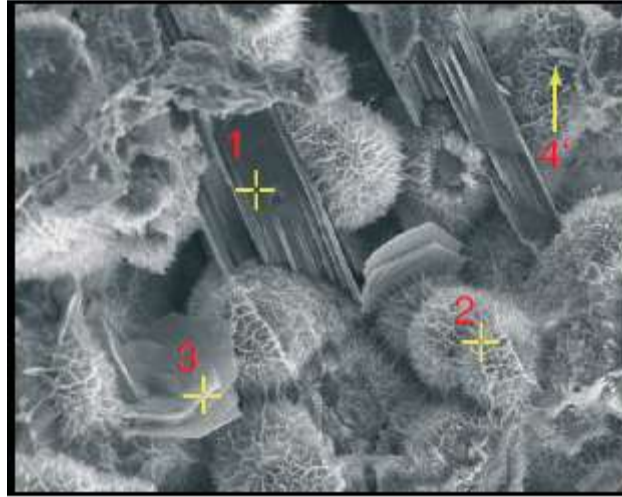


Figure I.5 : Matrice cimentaire (MEB) [Lerm, 2008].

1 : portlandite, 2 : C-S-H, 3 : aluminat de Ca hydraté 4 : ettringite

L'emploi du gypse joue le rôle de retardateur de prise pour les aluminates, en donnant naissance à une couche protectrice sur les grains, ce qui retarde l'hydratation. Les 4 principaux constituants ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ - $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ - $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ - $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) anhydres donnent en présence d'eau, naissance à des silicates et aluminates de calcium hydratés pratiquement insolubles dans l'eau

I.7. CINÉTIQUE ET CHALEUR D'HYDRATATION

Les minéraux du ciment présentent des vitesses d'hydratation différentes. C3A et C3S s'hydratent plus vite que C4AF et C2S. 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 C3S et l'eau (adsorption des molécules d'eau), le second effet thermique traduit la précipitation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et C-S-H [Bouglada, 2008].

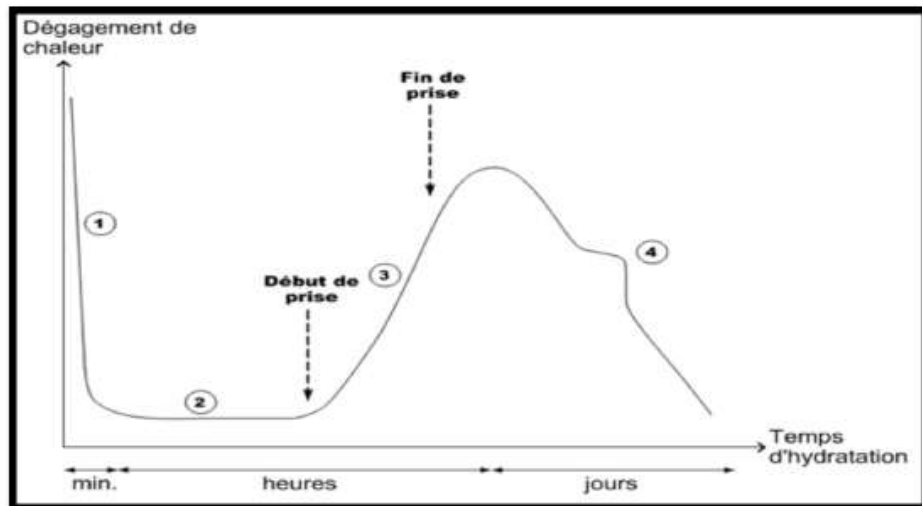


Figure I.6 : Courbe typique de calorimétrie isotherme d'un Ciment
[Bouglada, 2008].

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'ettringite 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 (ettringite, 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 pour hydrater tout le ciment. D'après Van Breugel (2001), la valeur critique est. $(E/C)_{crit} \approx 0.4$.

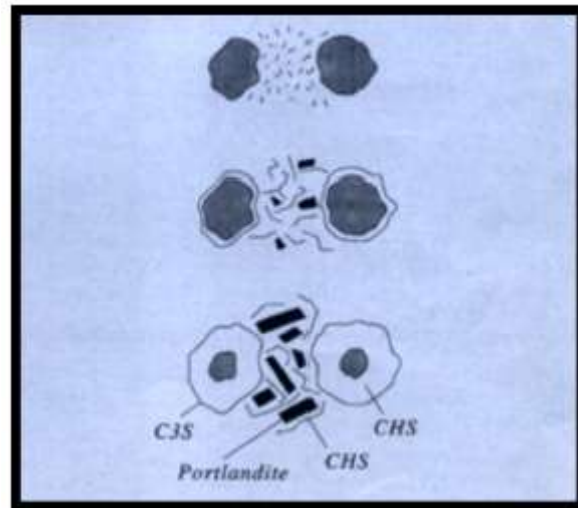


Figure I.7 : Les hydrates [Bouglada, 2008].

1.8. PROPRIETES TECHNIQUES DU CIMENT 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 ciment hydratée.
- L'hydroxyde de calcium ou Portlandite $[Ca(OH)_2]$, représente 5 à 15% en masse d'une pâte de ciment hydratée.
- Les sulfo-aluminates de calcium, l'ettringite et le monosulfate constituent 20 à 30% de la masse totale.

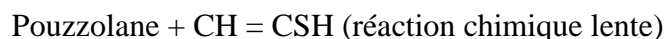
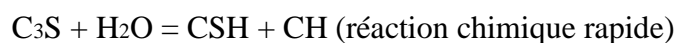
Les proportions citées ci-dessus correspondent aux CPA-CEM I, dans les autres classes de ciments, elles peuvent être très différentes compte tenu des différents ajouts minéraux (laitier, cendres volantes, fumée de silice, les tufs . . .).

L'idéal serait de pouvoir transformer **CH** en **CSH** ou **CAH**. Pour cela, on recherche des sous-produits dont la constitution chimique apportera des oxydes (SiO_2 et Al_2O_3) pour réagir avec $Ca(OH)_2$.

On utilise alors :

- des laitiers de haut fourneau trempés, pouzzolanes et des ajouts calcaires.

Les réactions d'hydratation du ciment et de la pouzzolane donnent:



Le comportement du ciment avec ajout minéral est déterminé par trois caractéristiques de la réaction pouzzolanique de l'ajout:

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

- Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réaction pouzzolanique consomme et améliore la résistance du béton en milieu acide.
- Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons par affinage de ces pores capillaires.



CHAPITRE 2

LES CIMENTS AVEC AJOUTS

CHAPITRE 2 : LES CIMENTS AVEC AJOUTS

2.1. INTRODUCTION

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.

Les ajouts minéraux sont largement utilisés dans la production des ciments à travers le monde. Du point de vue économique, ils présentent un facteur très important dans la production du ciment Portland composé (CPJ-CEMII/ A ou B), du moment que la consommation en clinker baisse en fonction du taux d'ajout utilisé.

2.2. COMPORTEMENT D'UN CIMENT AVEC AJOUT MINERAL

Le comportement du ciment avec ajout minéral est déterminé par trois caractéristiques de la réaction pouzzolanique de l'ajout.

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

Les substances hydrauliques latentes contiennent moins d'oxyde de calcium que le ciment Portland et ne réagissent de ce fait pas avec l'eau. Dans cette procédure, l'hydroxyde de calcium intervient en qualité d'activateur et non de partenaire réactif. Les substances pouzzolaniques ne contiennent encore moins, voire pas d'oxyde de calcium.

L'hydroxyde de calcium issu de l'hydratation du ciment Portland n'intervient pas, par conséquent, uniquement en qualité d'activateur, mais il est nécessaire en tant que réactif.

Les substances pouzzolaniques peuvent réagir fortement, moyennement ou faiblement contribuant ainsi plus ou moins à la résistance et à l'étanchéité du béton.

Les ajouts présentent une activité liante croissante avec leur quantité, leur finesse, leur composition minéralogique et le type de ciment influe également. En termes pratiques, cette activité liante se traduit par un gain de résistance [Hanafi, 2012].

2.3. CLASSIFICATION DES AJOUTS MINERAUX :

Ces matériaux proviennent principalement des sous-produits de l'industrie métallurgique, des centrales thermiques à charbon, de la nature et sont classés selon la norme NF EN 197 1 en ajouts minéraux inertes et actifs [Djobo, 2007]. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau (I.3) ci-dessous.

Tableau I.3 : Classification des ajouts selon leur réactivité [Bouglada, 2008].

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

2.4. PRINCIPAUX AJOUTS MINERAUX INERTES :

Ce sont des matériaux quasiment inertes, naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés et qui par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment Portland : ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau. Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et les Schistes calcinés [Belhocine, 2014].

2.4.1. Fillers calcaires:

Les fillers calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles (calcaires, basalte, bentonite, etc.) présentant une teneur en carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à

75%. Ces produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométries contrôlées et dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 micron. Les fillers se différencient les uns des autres par:

- leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qui' ils contiennent.

- leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.

- leur dureté, leur porosité.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine [Belhocine, 2014].

2.4.2. Sable de dune :

Le sable est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie...etc. ce matériau se trouve en grande quantité dans les régions sahariennes. Le sable de dune était utilisé depuis longtemps dans l'exécution des travaux de remblais, de fondations et les travaux routiers.

Le sable de dunes est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie. Ce matériau est pratiquement non exploité, malgré les éventuelles caractéristiques qu'il peut présenter.

L'introduction de ce nouveau matériau dans la construction, peut soulager davantage le Domaine d'habitat, et contribuer au développement des régions du sud algérien, très riches en sable de dune [Belhocine, 2014].

2.5. LES AJOUTS MINERAUX ACTIFS :

2.5.1. La pouzzolane:

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédants des propriétés liantes. Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments [Day, 1990] :

- *Pouzzolane naturelle:*

D'après la figure (I.8) Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et D'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolanique .Elle peut être d'origine volcanique: verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites.



Figure I.8 : pouzzolane naturelle [Belhocine, 2014].

- **Pouzzolane artificielle:**

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Les roches traitées thermiquement: argiles, schistes, latérite, bauxite.

2.5.2. La fumée de silice :

Les fumées de silice sont des particules très fines (taille moyenne des graines environ 1 μm) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans les fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliage Ferro silicium [Belhocine, 2014].

Tableau I.4 : composition chimiques de la fumée de silice [Belhocine, 2014].

Composés	Silicium (grise)	Ferrosilicium (grise)	blanche
SiO ₂	93.7	87.3	90
Al ₂ O ₃	0.6	1.0	1.0
CaO	0.2	0.4	0.1
Fe ₂ O ₃	0.3	4.4	2.9
MgO	0.2	0.3	0.2

2.5.3. Le laitier de haut fourneau :

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il voudrait peut-être mieux l'appeler est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et

d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker. D'un point de vue chimique tableau I.5, les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte. Le laitier est fondu à une densité beaucoup plus faible (de l'ordre de 2.8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7.0) de telle sorte que le laitier fondu flotte au-dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparés.

Tableau I.5 : Composition chimique type de laitiers de haut fourneau [Aitcin, 1968].

OXYDES	Laitier français	Laitier Nord USA	Laitier algérien
SiO ₂	29 à 36	33 à 42	38 à 42
Al ₂ O ₃	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe ₂ O ₃	4%	0.3 à 20	0.2
Mgo	6 %	3 à 12	4.7
S	1.5 %	-	0.15

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été broyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique.

La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons : [Belhocine, 2014]

- Broyage poussé
- Chaleur (étuvage, autoclavage)
- Produits chimiques (la chaux, la soude (Na OH) ou des sels de soude.

2.5.4. Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques. Les cendres volantes peuvent

avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que Celles – ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique. Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables **[GCI 712 CH.7]**.

Du point de vue minéralogique les cendres volantes se divisent en deux catégories : Les cendres volantes peuvent être de nature siliceuse ou calcaire. Les premières présentent uniquement des caractéristiques pouzzolaniques, celles de nature calcaire peuvent en outre posséder des caractéristiques hydrauliques, ces dernières consistant pour l'essentiel en Cao réactif, SiO₂, et Al₂O₃.

Les particules de cendres volantes se présentent sous forme de petites sphères de diamètre allant de 1 µm à 100 µm (50 % < 20 µm). La forme et la granulométrie des cendres volantes ont un effet important sur l'ouvrabilité et la demande en eau des bétons frais **[GCI 712 CH.7]**.

Le remplacement du ciment par des cendres volantes dans le béton réduit de façon significative la chaleur d'hydratation.

Le béton aux cendres volantes n'a besoin que d'une faible quantité d'eau pour assurer son ouvrabilité. Par conséquent, il en résulte moins de ressuage.

Réduit les risques de ségrégations, améliore les performances mécaniques à longs termes, diminue la perméabilité aux gaz et aux liquides et améliore la durabilité en milieux agressifs.

2.5. 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.

2.5.1. 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]**.

2.5.2. 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].

2.5.3. 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].

2.6. 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.

2.7. EFFETS DES AJOUTS SUR LES PROPRIÉTÉS DES BETONS :

2.7.1. 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 µm à un maximum de 34 % [Bouglada, 2008].

2.7.2. 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.

2.7.3. 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 C3A 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].

2.7.4. 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].

2.7.5. 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].

2.8. 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. Le tableau I.6 (donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes) [Hanafi, 2012].

Tableau I.6 : Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [Kerbouche and all, 2017].

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

2.9. 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.



CHAPITRE 3



***LES RECHERCHES EFFECTUEES
SUR LA PERLITE***

CHAPITRE 3 : RECHERCHES EFFECTUEES SUR LA PERLITE

3.1. INTRODUCTION

La première identification de la perlite en tant que verre volcanique particulier semble remonter à l'antiquité, peut-être dès le troisième siècle avant identification de la perlite en tant que verre volcanique [Langford, 1979]. D'autres auteurs situent les premières descriptions de la roche et de ses propriétés au XVIIIe et au XIXe siècle, mais ce n'est que depuis 1940-1950 environ qu'est née une véritable industrie de la perlite obtenue par expansion thermique rapide de cette roche. Sous sa forme naturelle, la perlite est une roche volcanique acide, vitreuse et hydratée, de couleur gris clair, verdâtre ou noirâtre, dont la composition chimique est celle d'une rhyolite (plus de 72% SiO₂). Fréquemment, la roche présente un aspect lustré, avec un débit caractéristique en perles à structure concentrique en pelures d'oignons mais elle peut également se présenter sous d'autres textures. Elle se distingue des autres verres naturels par une teneur en eau chimique de constitution de 2 à 5 % dans la structure vitreuse. Mais le terme perlite désigne également le granulats léger à structure cellulaire obtenu par expansion thermique rapide de cette roche, après qu'elle ait été broyée.

Nous allons présenter dans ce chapitre quelques résultats des études effectuées sur des matériaux cimentaires à base de la perlite.

3.2. CARACTERISTIQUES PHYSIQUE, CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE 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 [Molnar, 1989]. 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 [Thibaut et al, 2000].

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 I.9) [Ferk, 2012 ; Guenanou, 2014].

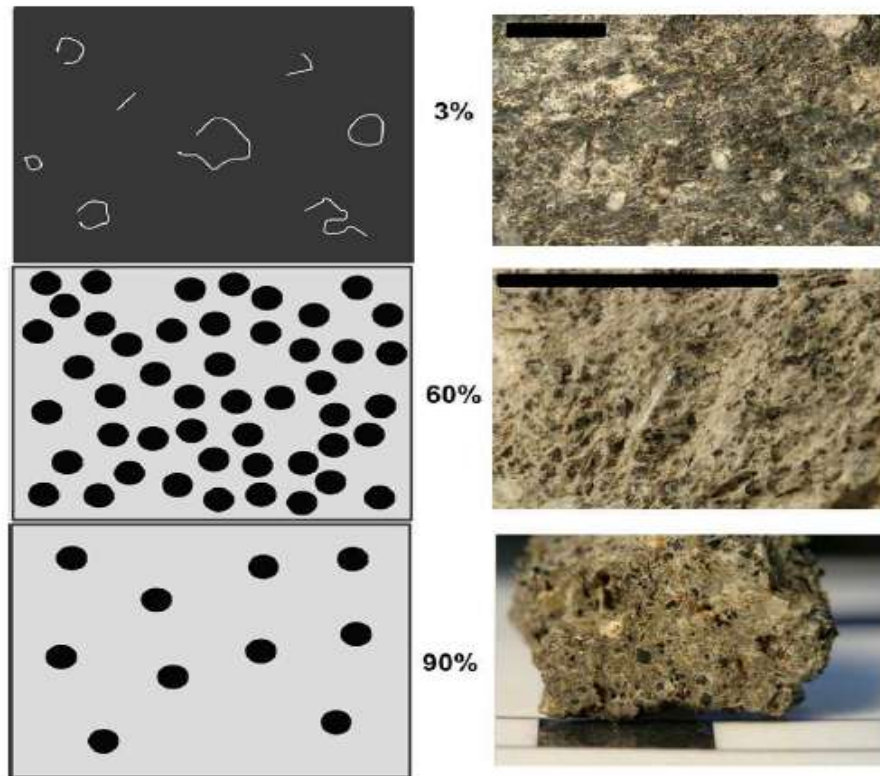


Figure I.9 : Les Différents degrés de perlitisation [Ferk, 2012].

Les plus importantes propriétés physiques de la perlite sont énumérées dans le tableau I.7.

Tableau I.7 : Propriétés physiques de la perlite brute [Herskovitch ET AL, 1996].

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)

Tableau I.8 : Une série d'analyses chimiques de minerais de perlite prélevée dans plusieurs endroits du monde.

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

On constate que la perlite se caractérise par une teneur élevée en silice (> 65%) et en alumine (7,5 à 18%). On notera également la teneur alcaline de 7 à 8,5%.

Minéralogiquement, la perlite est constituée d'un verre volcanique naturel hydraté dans lequel sont incorporées de petites quantités (jusqu'à 20%) d'inclusions cristallines. L'analyse par diffraction aux rayons X de la perlite, présente une structure cristalline qui se compose de nombreux pics et une bosse indiquant l'arrangement irrégulier et non- répétitif des atomes qui présentent la nature amorphe du matériau. Le tableau I.9 montre les phases minérales détectées dans les perlites de divers endroits dans le monde.

Tableau I.9 : Phases minérales détectées dans de différentes perlites à travers le monde
[Herskovitch et al, 1996 ; Erdem et al, 2007].

Localisation	Phases minérales
Nouveau-Mexique (USA)	Quartz, feldspath, biotite
Grèce	Quartz, Albite, biotite, Calcite
Corée du Sud (Guryongpo)	Plagioclase, biotite, minéraux opaques, traces de hornblende, apatite, zircon et sanidine
Sardaigne	Quartz, mica, feldspath
Turquie	Quartz, Albite, biotite, Cristobalite, Hauyne, Muscovite

3.3. LA PERLITE EN ALGERIE

3.3.1. La production de la perlite en Algérie

La perlite est une roche volcanique siliceuse, [Habert et al, 2008] (Figure I.10). La roche est d'abord concassée et calibrée par granulométrie. En apparence, extraite du gisement de Hammam Bouhrara situé à Tlemcen, Algérie. L'expansion industrielle de la perlite est réalisée dans des fours spéciaux, fixes ou rotatifs. Sous l'effet de la chaleur, les grains de perlite s'expansées : une multitude de cellules fermées se constituent à l'intérieur des grains. La perlite est utilisée sous forme d'une poudre tamisée à 80 μm , (Figure I.11) dans tous les essais [Donatello ; Tyrer, 2010].



Figure I.10 : scories de la perlite de hammam Bouhrara avant broyage [Hamadache, 2017].



Figure I.11 : Poudre de perlite de hammam Bouhrara broyée à 80 μm [Hamadache, 2017].

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 (ORGM) [ORGM, 2001]. 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 [LSUNMA, 1999 ; Guenanou, 2014]. Deux sites situés au Nord Est de Maghnia sont reconnus comme gisement de la perlite (voir tableau I.11). 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 I.10 : Les principaux gisements de la perlite de Maghnia [LSUNMA, 1999].

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

3.3.2. Localisation du gisement de la perlite de Hammam Boughrara

La perlite est extraite du gisement de Hammam Boughrara situé à Tlemcen, Algérie. En trouve cette forme des roches volcanique siliceuse, la figure I.12 représente localisation du gisement de Hammam Boughrara à Tlemcen.

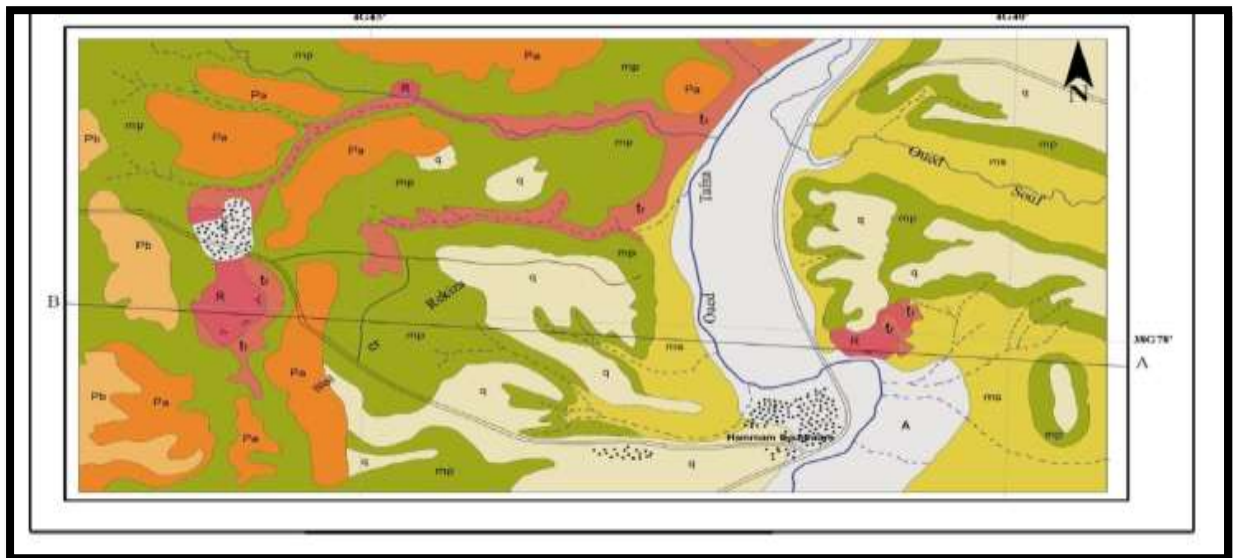


Figure I.12 : Localisation du gisement de Hammem Boughrara (TLEMEN)

[Hamadache, 2017]

La légende de cette carte est représentée dans la coupe verticale figure I.13

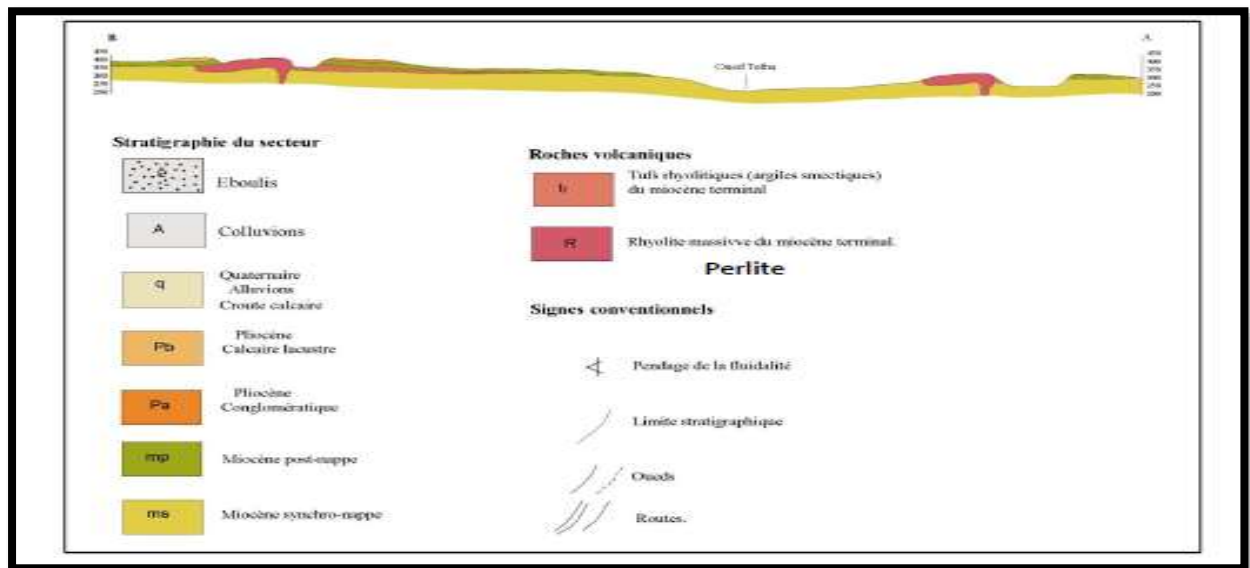


Figure I.13 : Coupe verticale géologique du gisement de Hammam Boughrara [Hamadache, 2017].

La composition chimique de la perlite broyée est montrée dans le tableau I.11.

Tableau I.11 : Composition chimique élémentaire de la perlite de Hammam Boughrara [Hamadache, 2017].

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Cl	CaCO ₃
3,16	76,40	13,43	2,92	0,01	4,33	0,82	0,37	0,008	8,75

La surface spécifique de Blaine de la perlite est de **4060 cm²/g** [Hamadache, 2017].

La masse volumique absolue de la perlite est de **2,43 g/cm³**.

3.3.4. ETUDE DES MATERIAUX CIMENTAIRES A BASE DE LA PERLITE :

3.3.4.1. Etudes à l'état frais

3.3.4.1.1. Résultats des essais de consistance

Mr HAMADACHE a constaté dans la figure I.14 que la consistance est normale pour la pâte du ciment CEMI et la pâte de ciment avec 10% de perlite (P10p), mais pour les pâtes pouzzolaniques leurs consistances sont élevées, plus le teneur de l'ajout pouzzolanique augmente plus la consistance augmente.

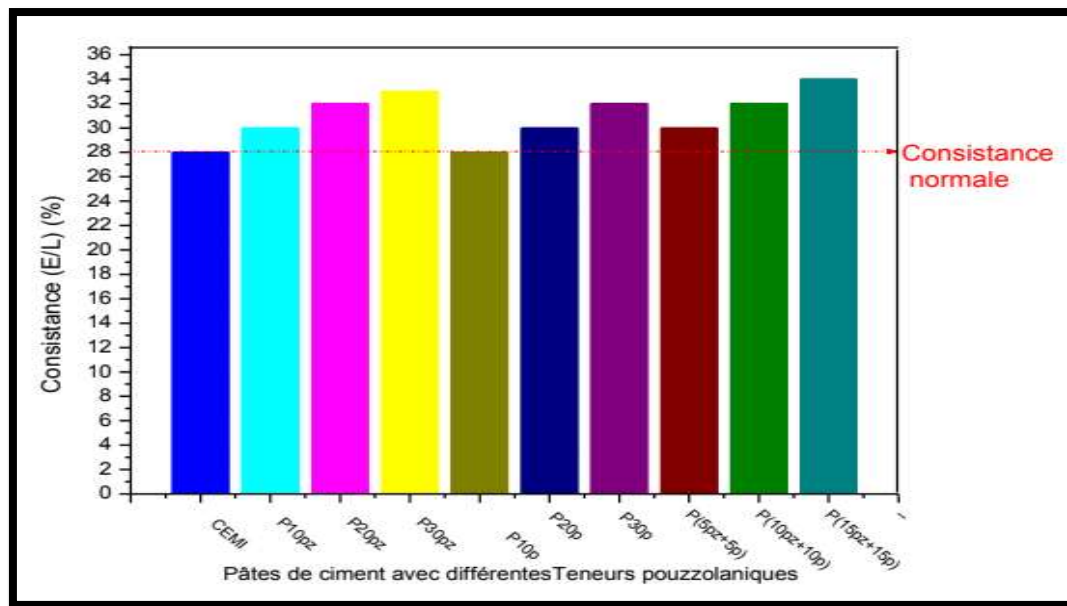


Figure I.14 : Variation de la consistance des pâtes de ciment en fonction des teneurs pouzzolaniques [Hamadache, 2017].

Les résultats obtenus par [Chihaoui, 2017] pour chaque composition de pâte de ciment sont présentées par la **figure I.14**. Il a pu constater que les besoins en eau des pâtes contenant la poudre de perlite naturelle sont supérieurs à celui du ciment sans ajout. Par conséquent, à mesure que la quantité de la perlite augmente, les besoins en eau, pour avoir une consistance normale, augmente également. Cela est probablement dû au fait que la poudre de perlite a une surface spécifique plus grande, et a donc besoin de plus d'eau lors de la préparation de la pâte. Plusieurs auteurs ont rapporté les mêmes constatations en utilisant la perlite naturelle ou la pouzzolane naturelle comme addition pouzzolanique pour produire des ciments mélangés [Erdem et al, 2007 ; Aichouba et al, 2005 ; Ghrici, 2006 ; Belaribi, 2015].

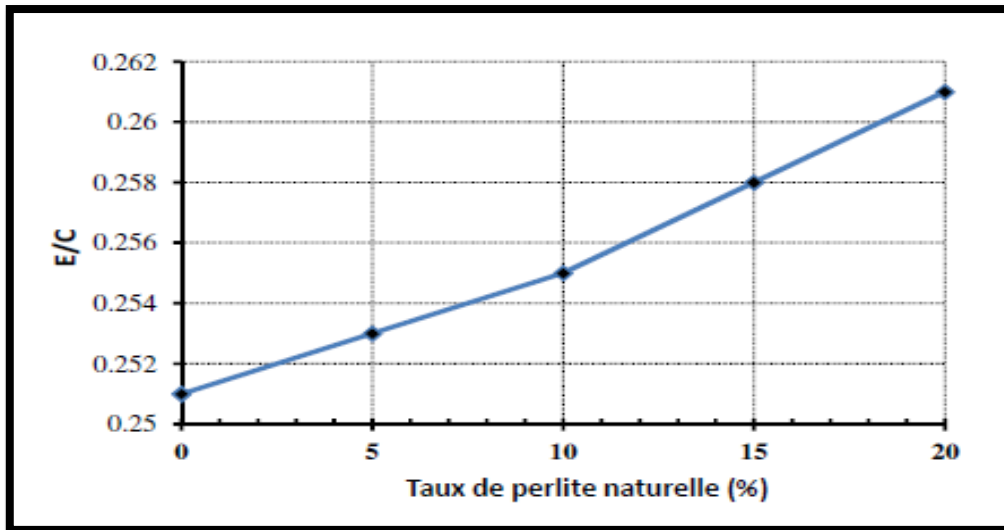


Figure I.15 : Variation de E/C pour avoir des pâtes à consistance normale [Chihaoui, 2017].

3.3.4.1.2. Résultats des essais de prise

Les résultats de [Chihaoui, 2017] révèlent clairement, comme le montre la **figure I.16**, que les temps de prise (début et fin) sont accélérés avec l'ajout de la perlite naturelle. La perlite naturelle utilisée dans cette étude, renferme une teneur élevée en Al_2O_3 (13,68 %), son incorporation dans le ciment, augmente la quantité des composés d'aluminate du mélange. Selon [Bresson, 2006], l'augmentation de la teneur d'un ciment en C_3A de 3 à 11%, diminue le temps de prise de moitié. En outre, l'accélération de la prise dans les pâtes incorporant la perlite naturelle peut être associée à la croissance de la formation d'hydrates de sulfate de calcium (tri et de monosulfoaluminate (TSA et MSA)).

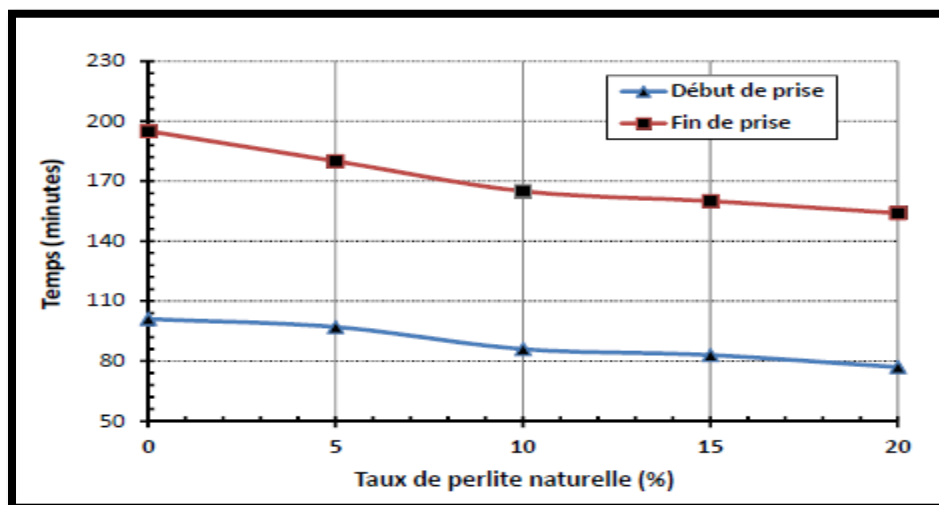


Figure I.16 : Evolution des temps de prise des différentes pâtes [Chihaoui, 2017].

Plusieurs chercheurs, rapportent des résultats similaires sur l'accélération des temps de prise dans le cas des pâtes incorporant des ajouts pouzzolaniques à teneur élevée en Al_2O_3 , comme la pouzzolane naturelle, les cendres volantes ou le métakaolin de forte demande en eau [Ali Aichouba et al, 2005 ; Ghrici, 2006 ; Belaribi, 2015 ; Naik et al, 2001 ; Brooks et al, 2000 ; Batis et al, 2005].

Par contre, [Erdem et al, 2007] ont trouvés que l'ajout de la perlite naturelle dans le ciment, prolonge les temps de prise. Cela a été attribué à l'effet de dilution de l'ingrédient le plus actif qui est le ciment. De plus, ils ont rapporté que les temps de prise se prolongent avec l'augmentation de la finesse de cet ajout.

En comparant la teneur en Al_2O_3 de la perlite naturelle de Maghnia aux perlites naturelles de deux régions différentes de Turquie (Izmir et Erzincan) étudiées par [Erdem et al, 2007], on trouve bien supérieure. La faible teneur en Al_2O_3 de ces perlites engendre la formation d'une faible quantité d'hydrates de sulfate de calcium ce qui explique leur effet de prolonger les temps de prise, alors que la perlite de Maghnia les accélère.

3.3.4.1.3. Résultats de l'essai de maniabilité

Les quantités d'eau de gâchage pour chaque mélange de mortier contenant différent pourcentage de perlite sont obtenues grâce à l'essai de maniabilité. Le rapport E/L à adopter pour les différents mélanges de mortiers est celui suffisant pour développer un étalement de $\pm 5\%$ de celui du mortier de ciment sans ajout de perlite [Chihaoui, 2017].

Le tableau I.12 fournit les détails des mélanges de mortier obtenus.

Tableau I.12 : Proportions des mélanges de différents mortiers.[Chihaoui, 2017].

Code	Liant	Sable/Liant	Eau/Liant	Etalement (%)
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

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.

Les conclusions obtenues, concordent bien avec celles de l'essai de consistance établi pour les différentes pâtes, dont on a expliqué que la croissance de la demande d'eau est principalement attribuée à l'augmentation progressive de la surface spécifique des liants incorporant la perlite naturelle.

En comparant l'influence de la perlite naturelle sur la maniabilité à celle de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, plusieurs chercheurs ont rapporté que cet ajout diminue la maniabilité des mortiers, d'où l'utilisation d'un plastifiant ou l'augmentation de la quantité d'eau afin d'obtenir une maniabilité comparable à celle du mortier de ciment pur [**Aichouba et al, 2005 ; Ghrici, 2006 ; Senhadji, 2013 ; Belaribi, 2015 ; Guenanou, 2014**] a constaté que la perlite de Maghnia demande plus d'eau que la pouzzolane naturelle de Béni-Saf.

3.3.4.2. Etude à l'état durci (Essais mécaniques)

Les résultats des résistances à la compression des éprouvettes de (50x50x50) mm³ sont donnés par la figure I.17 , Il est à signaler que les éprouvettes de mortiers sont conservées pendant une durée de 300 jours dans une eau saturée en chaux.

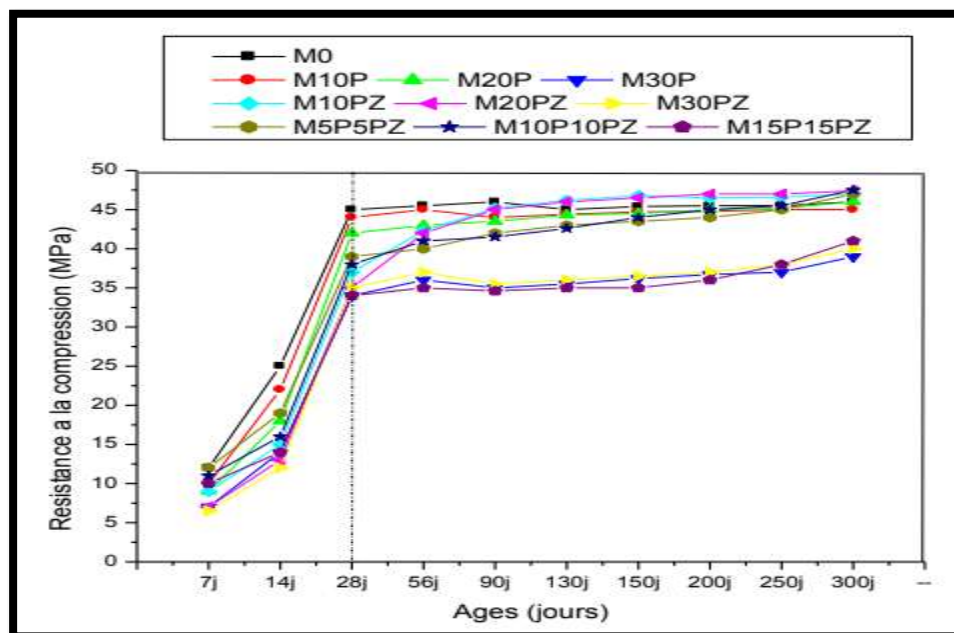


Figure I.17 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers dans l'eau saturée en chaux. [Hamadache, 2017].

D'après cette figure [Hamadache, 2017] remarque 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.

Selon [Day et Shi, 1491], 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.

Les résultats des essais à la traction des éprouvettes de mortiers (40x40x160) mm³ immergées durant 300 jours dans une eau saturée en chaux sont présentés dans la figure I.18

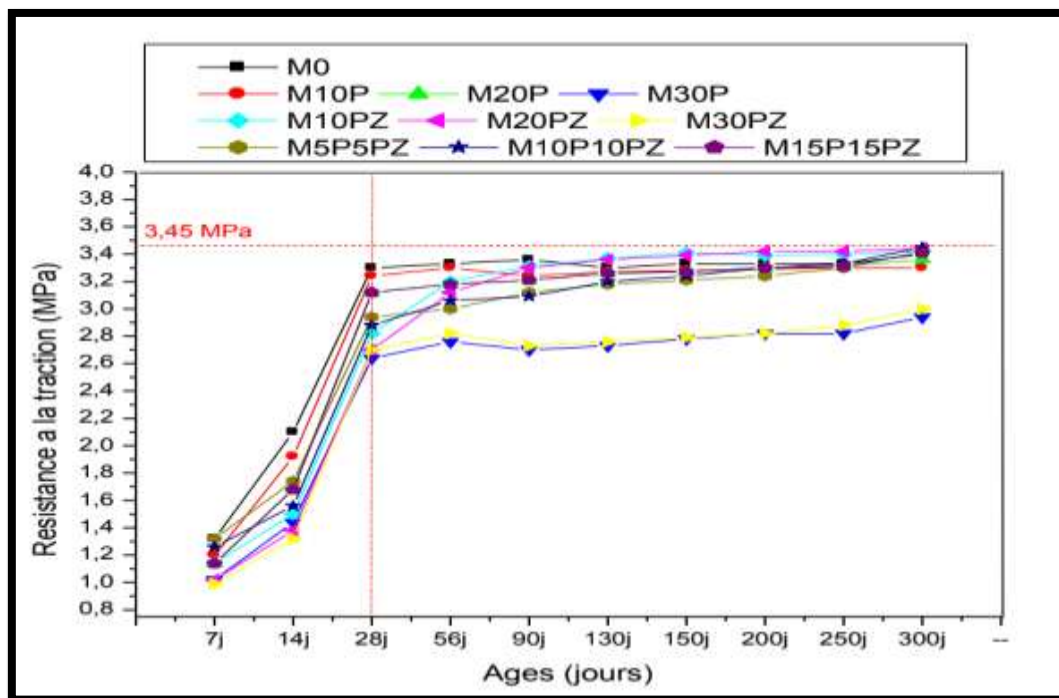


Figure I.18 : Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des mortiers dans l'eau saturée en chaux.[Hamadache, 2017].

Il est à noter 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.

3.4. CONCLUSION

Dance ce chapitre nous avons évoqué les recherches effectuées sur la perlite à l'état frais et durci.

A l'état frais, les travaux avaient pour objectif la détermination des valeurs de rapport E/L par l'essai de consistance qui a révélé que la présence de la pouzzolane naturelle de Béni Saf et surtout la perlite implique une augmentation du besoin de la quantité d'eau.

Les résultats des mesures de temps de prise des différentes pâtes ont montré que l'incorporation des ajouts en particulier la perlite à l'accélération de la prise.

A l'état durci, La résistance à la compression des mortiers incorporant jusqu'à 20% de perlite naturelle, satisfait largement aux exigences de la résistance minimale spécifiée dans la norme ASTM C1157.



PARTIE II

MATERIAUX ET METHODES

EXPERIMENTALES



CHAPITRE 1

Matériaux utilisés



CHAPITRE 1 : MATERIAUX UTILISES

1.1. INTRODUCTION

L'incorporation des ajouts minéraux tels que la perlite est une technique importante qui permet d'améliorer les propriétés des matériaux cimentaires telle que la fluidité, la résistance, la durabilité, etc. Ces additions affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement relié avec le développement de retrait, la durabilité des matériaux durcis.

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.

Les modes opératoires et les méthodes d'essais de caractérisation des constituants décrits dans ce chapitre s'appuient sur des textes normatifs.

Les matériaux qui ont été utilisés durant cette recherche sont décrits dans ce chapitre.

Les différentes manipulations utilisées pour la caractérisation des poudres (ciments, Sable normalisé, perlite) sont effectuées au niveau des laboratoires suivants :

- *Laboratoires 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)*
- *Laboratoire de la cimenterie LAFARGE à Sig (Mascara)*

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 10 % de perlite en substitution au ciment.
3. Un mortier avec 20 % de perlite en substitution au ciment.

1.2. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

La caractérisation des matériaux de construction nécessite la connaissance de la nature de ses composants. Par ailleurs, la détermination des dosages optimaux, ainsi que l'illustration des certaines interprétations ne pourraient être possible que si les différents constituants sont bien caractérisés

1.2.1. Le ciment

Le ciment utilisé pour la confection de nos mortiers est un CEM II B 42.5 provenant de la cimenterie LAFARGE M'SILA.

1.2.1.1. Caractéristique physique

La masse volumique apparente est obtenue par la pesée d'un récipient d'un litre rempli de ciment sans aucun tassement comme le montre la figure II.1.



Figure II.1 : la masse volumique apparente du ciment.

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



Figure II.2 : Masse volumique absolue du ciment CPJ CEM II 42.5 R.

Le tableau II.1 résume les caractéristiques physiques du ciment utilisé dans notre étude.

Tableau II.1 : caractéristiques physiques du ciment.

Caractéristique	Valeurs
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.15
Masse volumique absolue (g/cm ³)	3.1
Finesse (cm ² /g) (COSIDER ENGINEERING)	4425

1.2.1.2. Composition chimique et minéralogique

➤ **Analyses chimiques :**

Tableau II.2 : Composition chimique du ciment (LAFARGE).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₂	Cl-	CaO libre	Perte au feu	Résidu insoluble
19.34	5.37	3.00	61.69	1.80	0.76	0.14	2.20	0.027	0.97	5.03	1.12

➤ **Composition minéralogique du clinker (Bogue) :**

Tableau II.3 : composition minéralogique du clinker(LAFARGE).

C ₃ S %	58.3
C ₃ A %	8.7
C ₂ S %	14.6
C ₄ AF %	11.26

1.2.2. Perlite naturelle

La perlite naturelle utilisée a été fournie par l'entreprise nationale FERPHOS, extraite du gisement de Hammam Bouhrara situé à Maghnia (Nord-Ouest algérien). Ce matériau sous forme de roches, après concassage a été séché à 105 °C dans une étuve pendant 24 heures pour éliminer l'eau libre, puis broyé (Figure II.3).



Figure II.3 : (a) Roche de la perlite naturelle avant broyage, (b) Poudre de la perlite naturelle après broyage [Chihaoui, 2017].

1.2.2.1. Caractéristique chimique

La composition chimique de la perlite naturelle, est donnée dans le Tableau II.4 :

Tableau II.4 : Composition chimique élémentaire de la perlite naturelle[Chihaoui, 2017].

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

1.2.2.2. Caractéristique physique

La masse volumique absolue de la perlite naturelle mesurée au pycnomètre suivant la norme NF P 18-555 est: $r = 2,24\text{g/cm}^3$.



Figure II.4 : Masse volumique absolue de la perlite.

La finesse de la poudre de perlite naturelle, caractérisée par la surface spécifique de Blaine est mesurée suivant la norme NF EN 196-6 [1990], est : $SSB = 4400\text{ cm}^2/\text{g}$ [Chihaoui, 2017].

1.2.3. Le sable

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur les qualités du béton et du mortier.

Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées et le prix de revient des bétons. Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments nocifs.

Dans notre étude expérimentale, nous avons utilisé un sable siliceux de la société d'ADWAN zone industrielle Fornaka Mostaganem.

Le sable siliceux (ADWAN) est un sable industriel, La composition du sable varie d'un endroit à l'autre selon la nature des roches. Dans l'industrie du verre, de la fonderie et d'autres domaines, le sable recherché est celui qui a une grande teneur en silice, un bon classement et des grains arrondis: sont appelés sables siliceux ou sables industriels.



Figure II.5 : sable siliceux d'Adwan.

1.2.3.1. Analyse chimique du sable

Tableau II.5 : composition chimiques du sable(ADWAN).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	TiO ₂	H ₂ O	L.O.I
97.20%	3.70%	0.30%	0.003%	0.240%	0.023%	0.02%	0.24%

1.2.4. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la préparation des pâtes et des mortiers est l'eau distillée. Pour notre étude on utilise l'eau potable «eau de robinet» fournie au laboratoire *M.D.C de Mostaganem*.

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 .

Le tableau II.6 résume les caractéristiques du plastifiant utilisé.

Tableau II.6 : Caractéristiques physiques et chimique de l'adjuvant.

FORME	LIQUIDE
Couleur	Burn Clair
Densité	1,040± 0,015
PH	4.7 ± 1
Teneur en chlore	≤ 0,1 %
Teneur enNa ₂ O	≤ 0.5 %
Plage du dosage recommandée	0,3<%<1,5
Extrait sec	11.5±1.5%

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

Méthodes expérimentales



CHAPITRE 2 : METHODES EXPERIMENTALES

2.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons les différents essais au cours de notre recherche, essais de caractérisations physiques des matériaux, essais d'absorption capillaire sur mortiers en mentionnant les différents mélanges étudiés dans lesquels trois pourcentages de la perlite ont été utilisés (10 et 20 %). Un mortier témoin sans pouzzolane a été élaboré pour les besoins de comparaison. Nous précisons également les différentes méthodes d'essais utilisés ainsi que leurs modes opératoires et les références de leurs normes correspondantes.

L'organigramme présenté par la figure II.1 récapitule de manière exhaustive la campagne expérimentale menée suivant le type d'essai réalisé.

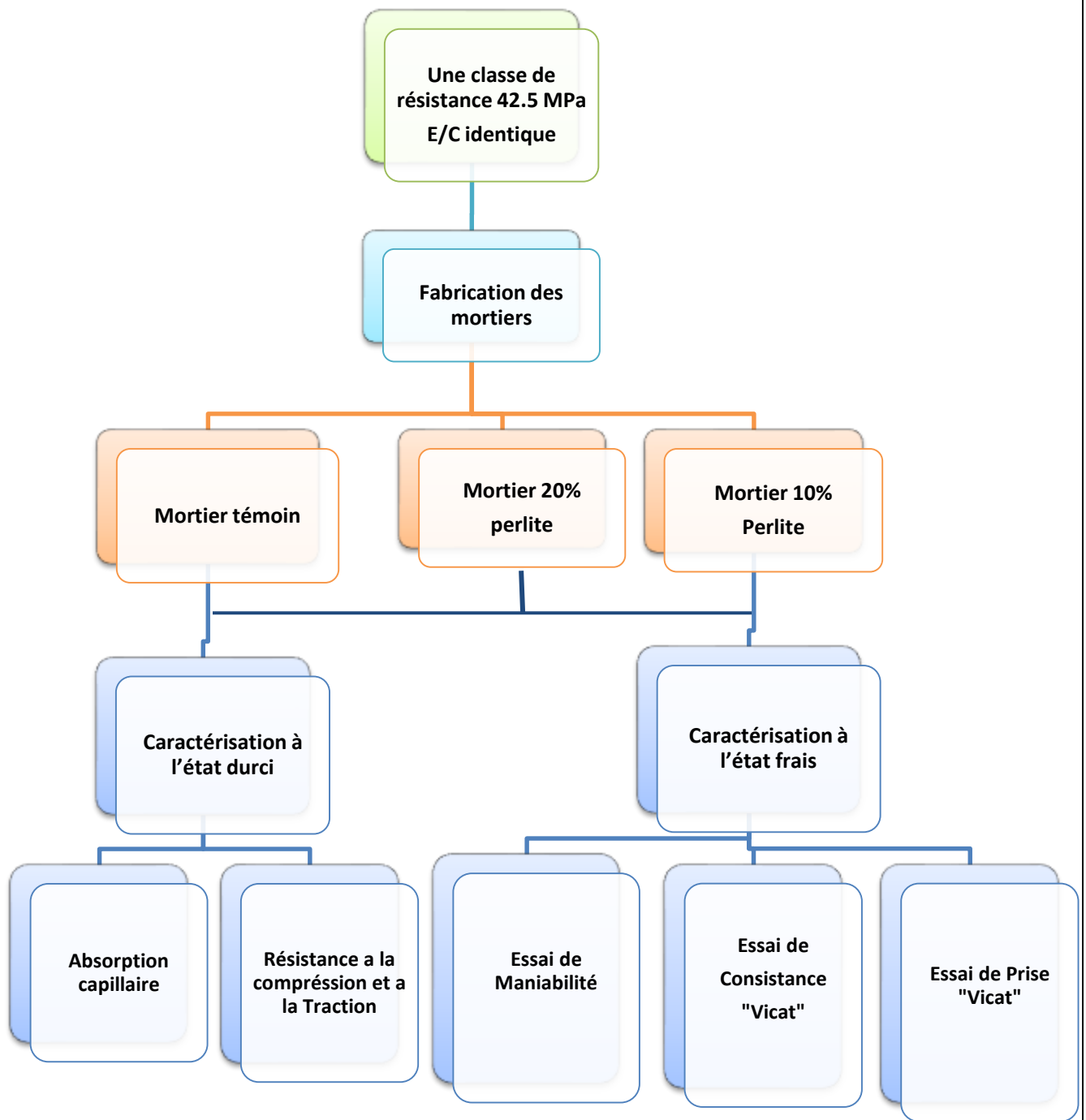


Figure II.1 : Organigramme résumant le travail expérimental mené dans cette étude.

2.2. ESSAIS SUR PATES NORMALISEES

2.2.1. Essai de consistance

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

2.2.1.2. Objectif de l'essai

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

2.2.1.3. Principe d'essai

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

2.2.1.4. Équipement nécessaire

- Un malaxeur.
- Un appareil de VICAT (voir Figure II.2)
- Une balance permettant de peser à 1 g près.
- Une Chronomètre précis à 1 s près.

2.2.1.5. Conduite de l'essai

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

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

Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le tableau II.1

Tableau II.1 : Les opérations du malaxage [LA NORME EN 196-3].

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment	Malaxage	Raclage de la cuve	Malaxage
Durée	5 < t < 10 sec		90 sec	15 sec	90 sec.
Etat du malaxeur	<i>Arrêt</i>		<i>Vitesse lente</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Vitesse lente</i>

- **Quatre minutes après le début du malaxage**, la sonde est amenée à la surface supérieure de l'échantillon (moule tronconique) et relâchée sans élan. La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), on mesure la distance **d** séparant l'extrémité de la sonde et de la plaque de base.
- **Cette distance (d) caractérise la consistance de la pâte étudiée.**
 - Si **d = 6 mm ± 1 mm**, l'essai est concluant et la consistance est normale.
 - Si **d ≤ 5 mm**, la pâte est trop mouillée et il faut recommencer l'essai avec moins d'eau.
 - Si **d ≥ 7 mm**, la pâte est trop ferme et il faut recommencer l'essai avec plus d'eau.

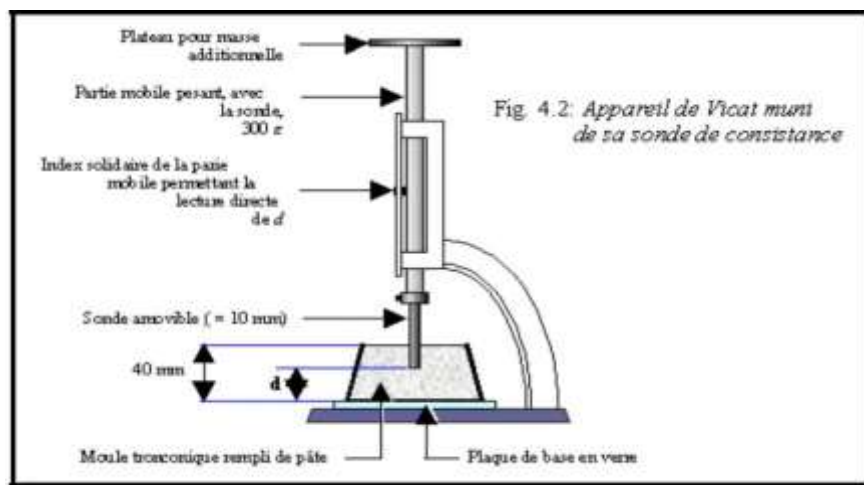


Figure II.2 : Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance.

Les différentes étapes de l'essai sont présentées par la **figure II.3**



Figure II.3 : Mesure la consistance de la pâte de ciment.

2.2.2. Mesure des temps de début et fin de prise de la pâte

2.2.2.1. Objectif de l'essai

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

2.2.2.2. Principe d'essai

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

2.2.2.3. Equipement nécessaire

- Salle climatisée : L'essai doit se dérouler dans une salle, dont la température est de $20^{\circ} \text{C} \pm 1^{\circ} \text{C}$ et dont l'humidité relative est supérieure à 90%. A défaut d'une telle humidité relative, l'échantillon testé pourra, entre deux mesures, être entreposé dans de l'eau maintenue à $20^{\circ} \text{C} \pm 1^{\circ} \text{C}$.
- Malaxeur normalisé
- Appareil de Vicat (voir figure II.4 et II.5).
- Balance précise à 0,1 g près.
- Chronomètre précise à 0,1 s près

2.2.2.4. Conduite de l'essai

Il s'agit de confectionner une pâte de consistance normalisée (Voir **tableau II.1**)

Quatre minutes après le début du malaxage, l'aiguille est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse). L'aiguille alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base. Recommencer l'opération à des intervalles de temps convenablement espacés (~ 10-15 mn)

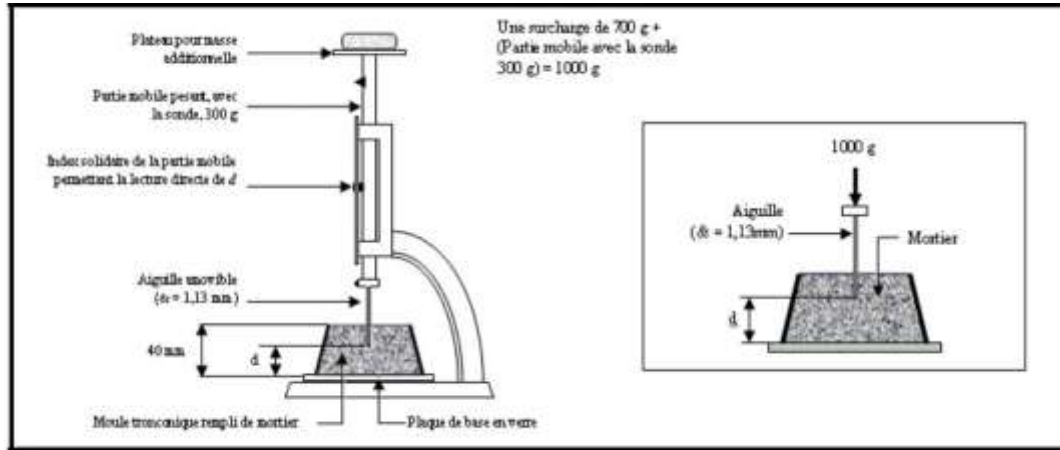


Figure II.4 : Essai de prise avec appareil de Vicat.

Si $d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ on dit que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début du malaxage, est appelé «temps de début de prise».

Le « temps de fin de prise » est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de **0,5 mm**.

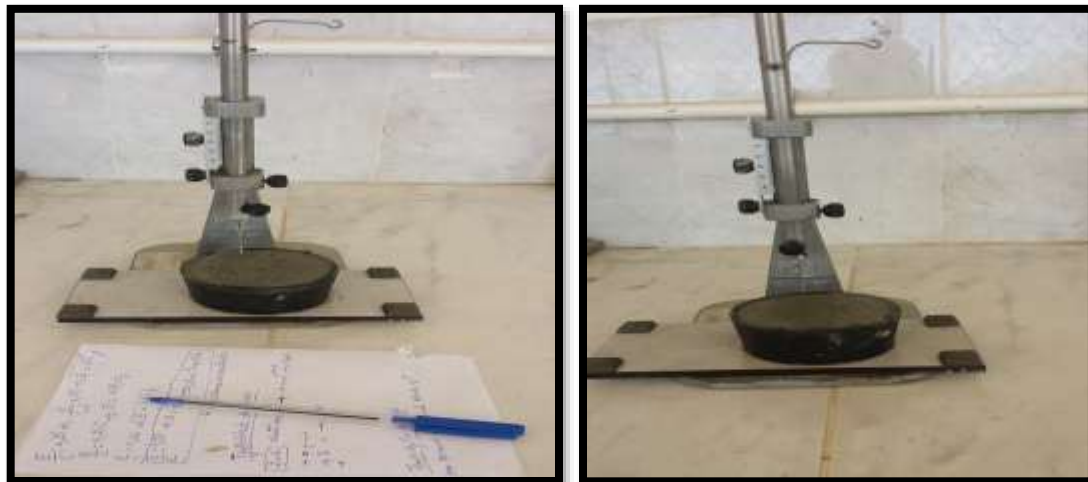


Figure II.5 : Essai de prise.

2.3. ESSAIS SUR MORTIERS A L'ETAT FRAIS

2.3.1. Formulations des mortiers

Le tableau II.2 donne les composants et leurs dosages utilisés pour l'élaboration des mortiers avec et sans ajouts.

Tableau II.2 : 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	430	360
Perlite (g)	0	43	81.82
Eau (g)	225	215	204.5
Vol. de la pâte (cm ³)	370,2	370,2	370,2

Avec :

- M0:** mortier témoin sans perlite
- M1:** mortier avec 10% de perlite
- M2:** mortier avec 20% de perlite

2.3.2. 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 II.6)

2.3.2.1. Equipement utilisé :

La maniabilité du mortier frais est déterminée à l'aide du maniabilimètre (Figure II.6).



Figure II.6 : Maniabilimètre.

L'appareil utilisé est schématisé sur la (Figure II.6). 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.

2.3.2.2. 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 II.7). 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.

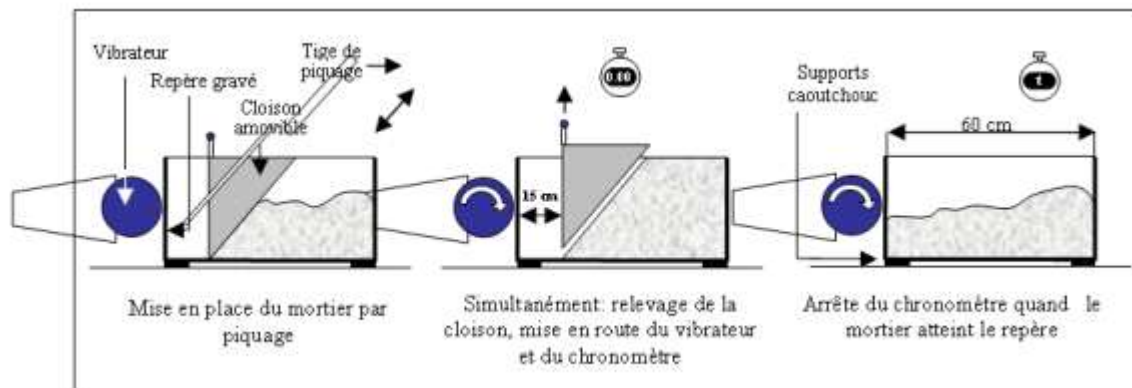


Figure II.7 : procédure de l'essai de maniabilité.

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 II.3.

Tableau II.3 : 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	$t \leq 10$

2.3.3. Confection des mortiers :

Mélanger le sable normalisé avec le ciment (avec ou sans ajout) et l'eau dans les proportions données par le tableau II.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 II.8), y verser ensuite le ciment ; aussitôt après, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.



Figure II.8 : 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 (II.4).

Tableau II.4 : 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

2.3.4. 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 raison de **60 chocs** manuellement (à main nue) 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 II .9 : Moule d'éprouvettes prismatiques (40x40x160) mm.

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)



Figure II.10 : Aspect des éprouvettes après démoulage.

2.4. ESSAIS SUR MORTIERS A L'ETAT DURCI

2.4.1. Essais d'absorption capillaire

2.4.1.1. Principe

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

2.4.1.2. 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 ;

2.4.1.3. 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 II.11*)
- 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 II.11 : 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 (*figure II.12*)



Figure II.12 : la pesée des éprouvettes.

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

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

Où :

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

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

2.4.2. 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 4x4x16 cm³ 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'épreuves 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 EN 196-1)

- Un malaxeur normalisé.
- Des moules normalisés permettant de réaliser 3 épreuves prismatiques de section carrée 4cm x 4cm et de longueur 16cm
- Une machine d'essai de résistance à la flexion et à la compression (*figure II.13*) permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150KN avec une vitesse de mise en charge de 50N/s ± 10N/s à 2400 N/s ± 200N/s. La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion (*figure II.14*).

2.4.3.4. Conduite de l'essai

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

Avec le mortier normal préparé, on remplit un moule 4x4x16. 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 épreuves sont démoulées et entreposées dans l'eau 20°C ± 1°C jusqu'au moment de l'essai de rupture.



Figure II.13 : la machine de résistance mécanique.

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

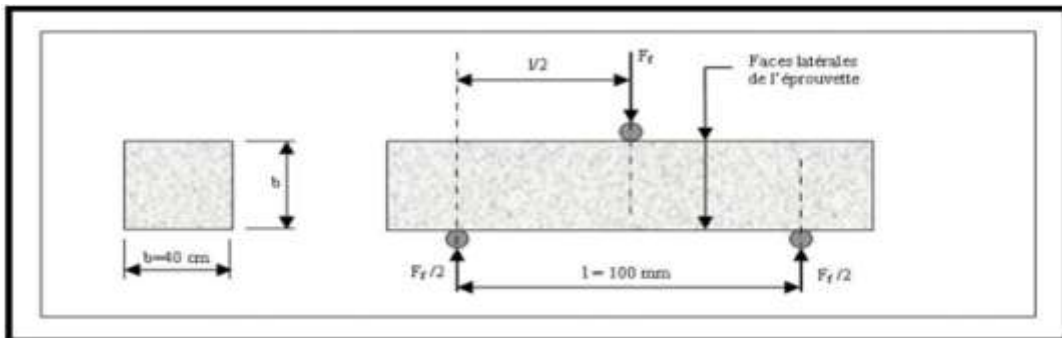


Figure II.14 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.



Figure II.15 : 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 mégapascals (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 :

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

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.

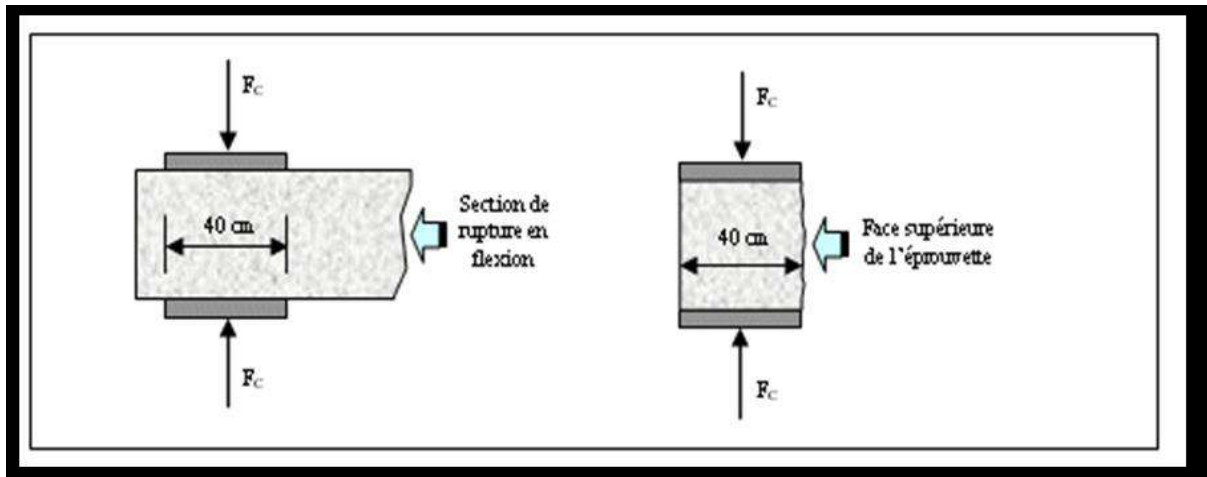


Figure II.16 : Dispositif de rupture en compression.



Figure II.17 : 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 et des pâtes 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 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

Résultats et discussions



CHAPITRE 1

Résultats des essais à l'état frais

CHAPITRE 1 : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT FRAIS

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%, 10% et 20%). Il s'agit des essais de consistance et de prise sur la pâte de ciment, et des essais de maniabilité sur les mortiers.

1.2. RESULTAT DES ESSAIS DE CONSISTANCES

Les résultats de consistance obtenus pour chaque composition de pâte de ciment sont notés dans le tableau III.1, et présentés par la figure III.1 :

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

Les pâtes	Pâte 0	Pâte 1	Pâte 2
Eau (g)	135	137.5	138.5
Ciment (g)	500	450	400
La perlite (g)	0	50	100
E/L	0.27	0.275	0.277

Avec : **Pâte 0** : pâte témoin à 0% de perlite et 100% de ciment.

Pâte 1 : pâte à 10 % de perlite et 90 % de ciment

Pâte 2 : pâte à 20 % de perlite et 80 % de ciment

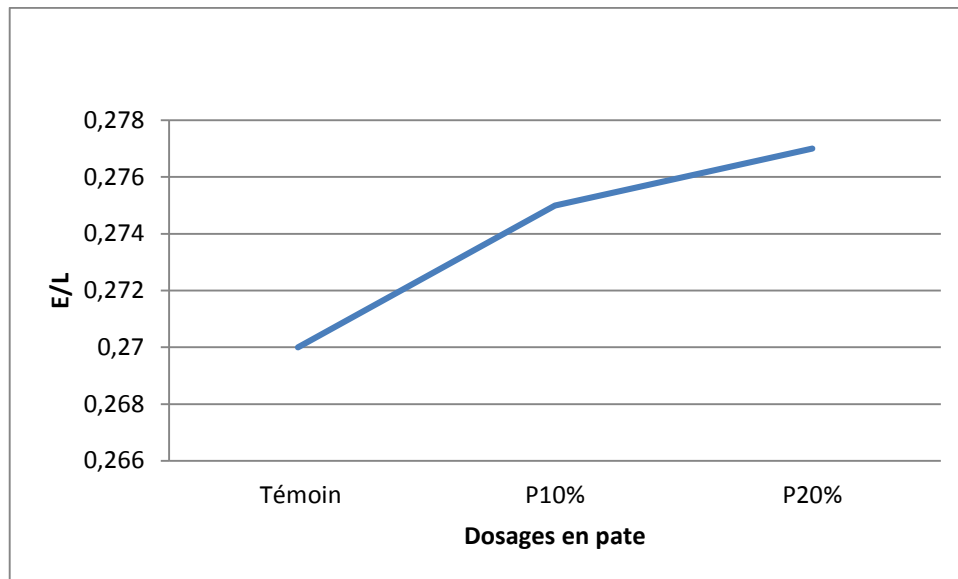


Figure III.1 : Variation des rapports E/L en fonction du dosage en perlite.

On remarque dans la figure III.1 que le rapport E/L augmente avec l'augmentation du pourcentage de perlite, cela est dû à la finesse de la perlite qui absorbe et réduit une partie importante d'eau destinée à l'hydratation du ciment.

1.3. ESSAI DE PRISE

L'essai de prise a pour but de déterminer le temps de prise, c'est-à-dire qui s'écoule entre l'instant où le liant a été mis en contact avec l'eau de gâchage et de prise et fin de prise.

Le tableau III.2 et la figure III.1 donne les valeurs des temps de début de prise, de fin de prise et les temps de prise, mesurés sur des pâtes témoin et celles contenant **10 et 20 de perlite** par rapport au dosage du ciment.

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

	Pourcentage d'ajouts	Début de prise (minutes)	Fin de prise (minutes)	Temps de prise (minutes)
TEMOIN	0%	181	280	99
PERLITE	10%	170	255	85
	20%	162	247	85

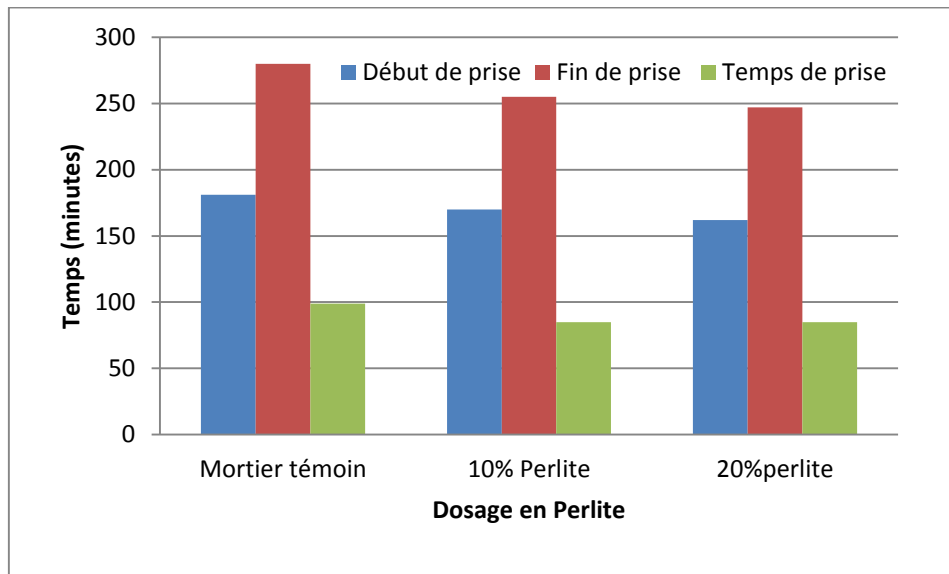


Figure III.2 : Temps de prise des pâtes à base de perlite

Il est à noter que le remplacement de 10 et 20% du ciment par la perlite augmente la quantité d'eau nécessaire pour l'obtention de la consistance normale du liant. Ceci est dû probablement à la grande surface spécifique présentée par le mélange et donc un fort appel aux molécules d'eau afin de mouiller toute la surface est constaté.

Concernant la prise et d'après les résultats de la figure III.2 il apparaît que l'ajout de la perlite affecte légèrement les temps de prise puisqu'un écart de 14 **minutes** est enregistré entre la pâte témoin et celle dont **20%** de ciment ont été remplacés par la perlite. On note par ailleurs des temps de prise équivalents pour les pâtes à base de **10** et **20%**.

Par contre en comparant les temps de début de prise et de fin de prise, nous remarquons que ces derniers diminuent légèrement avec l'augmentation des dosages en ajouts ce qui présente un intérêt en cas de bétonnage par temps froid.

Ces résultats prouvent que la présence de la perlite dans les mortiers même à un dosage de **20%** n'affecte pas beaucoup le temps de prise.

1.4. MANIABILITE

Les tests de caractérisation de la maniabilité sont menés dès la sortie du malaxeur, avant le moulage des corps d'épreuve. Le tableau III.3 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 III.3 : 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 (10%)	0.5	9.87
Mortier avec (20%)	0.5	9.93

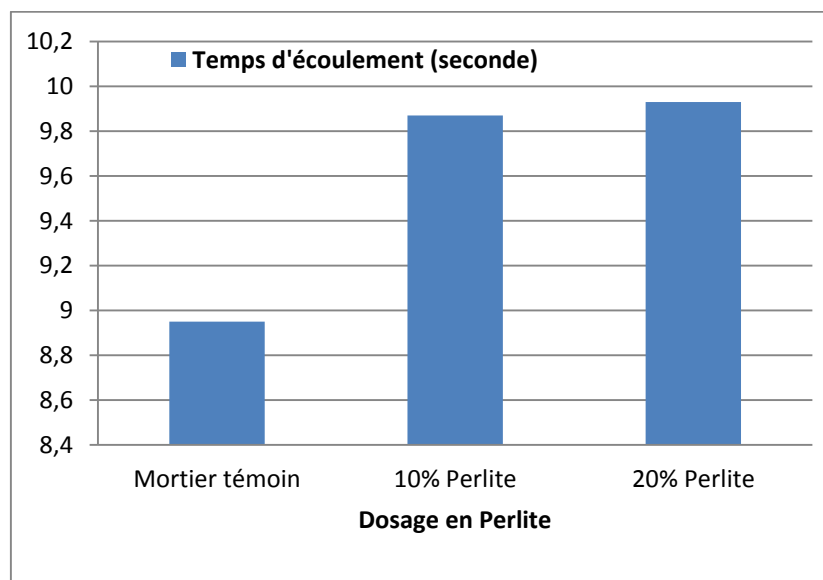


Figure III.3 : Temps d'écoulement en fonction du dosage en Perlite des mortiers.

- Les dosages du plastifiant introduit sont donnés par le tableau III.4 :

Tableau III.4 : Dosages du plastifiant des mortiers à base de Perlite.

% 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

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.

1.5. CONCLUSION

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

Les essais menés à l'état frais sur pâtes avaient révélé que la présence de la perlite augmente la quantité d'eau nécessaire pour l'obtention de la consistance.

Les résultats des mesures de temps de prise des différentes pâtes ont montré que l'incorporation d'ajout en particulier la perlite contribue légèrement à l'accélération de la prise, et affecte 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



Résultats des essais à l'état 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 60 jours.

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.

Le tableau III.4 et la figure III.4 représentent les résultats obtenus de l'essai d'absorption capillaire des mortiers confectionnés avec 10% et 20 % de perlite et le mortier témoin.

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

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

➤ **Exemple pour le mortier témoin :**

La moyenne de 3 pesées des échantillons, $M_0 = 563.4\text{g}$

Après 7 jours, la moyenne des 3 échantillons $M_7 = 584.8\text{g}$

Donc :

$$C = \frac{584.8 - 563.4}{16} = 1.34 \text{ g/cm}^2$$

Tableau III.1 : Coefficients d'absorption capillaire.

Les différents mortiers	Absorption capillaire (g/cm ²)	
	1 jour	7 jours
Mortier témoin	0.78	1.34
10 % la perlite	0.73	1.29
20 % la perlite	0.55	1.05

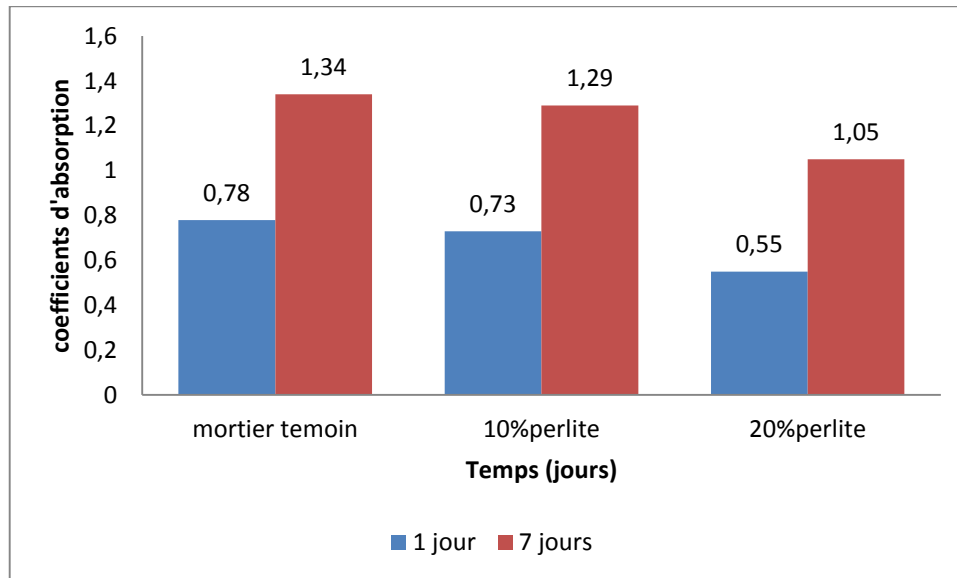


Figure III.4 : Evolution des coefficients d'absorption capillaire des différents mortiers.

La figure III.4 présente l'influence de la perlite naturelle sur l'absorption d'eau des mortiers à l'âge de un 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 **20%** 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 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.

2.3. RESISTANCES MECANQUES DES MORTIERS

2.3.1. Détermination de l'indice d'activité pouzzolanique

$$I_p = \frac{32.478}{39.608} = 0.82 \Rightarrow 82\%$$

On a conclue que :

L'indice d'activité pouzzolanique = 0.82 > 0.67 condition vérifier pour notre cas avec des proportions pouzzolanique donc selon la norme ASTM C125-07 la perlite est donc dit pouzzolanique, en présence d'eau, il présente la propriété de se combiner avec la chaux pour former un liant.

2.3.2. Résistances à la traction

Les résultats des mesures des résistances à la traction ont été obtenus par rupture à la flexion trois points des éprouvettes (4*4*16cm³) à base de 10 % et 20% de perlite et celles du mortier témoin.

Le tableau III.2 et la figure III.5 présentent les résultats des résistances à la traction en MPa en fonction du temps et du dosage en Perlite.

Tableau III.2 : Résistances à la traction par flexion (MPa).

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

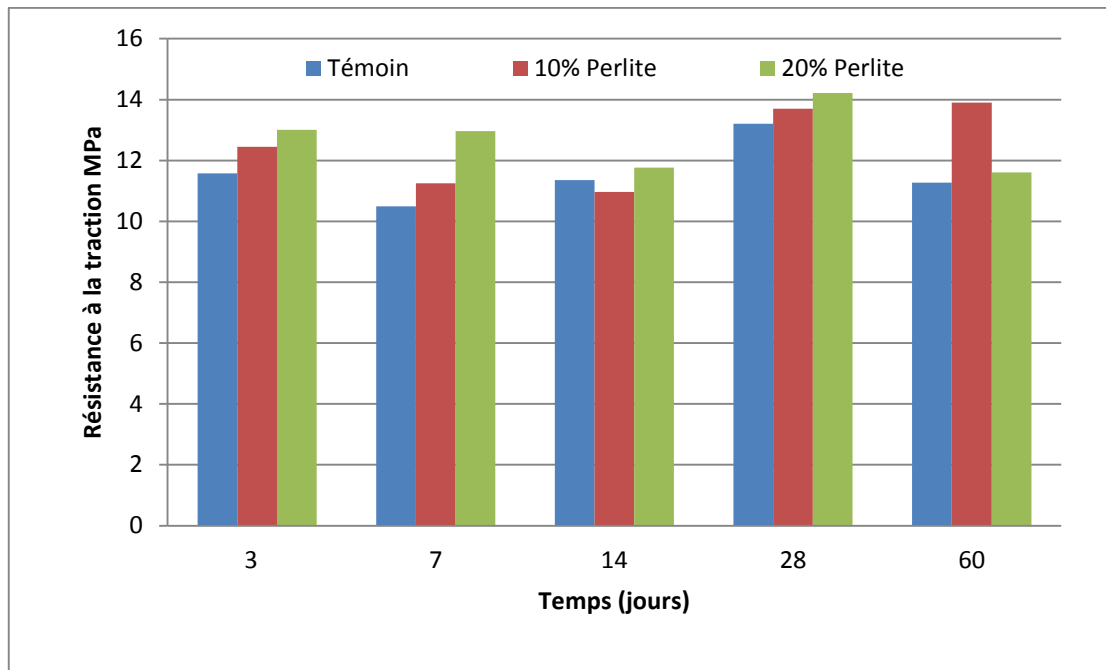


Figure III.5 : Evolution des résistances à la traction (MPa).

La figure III.5 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 est supérieure à celle des mortiers à 10% de Perlite et au mortier de référence

2.3.3. 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 III.3 et la figure III.6.

Tableau III.3 : Résistances à la compression (MPa).

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

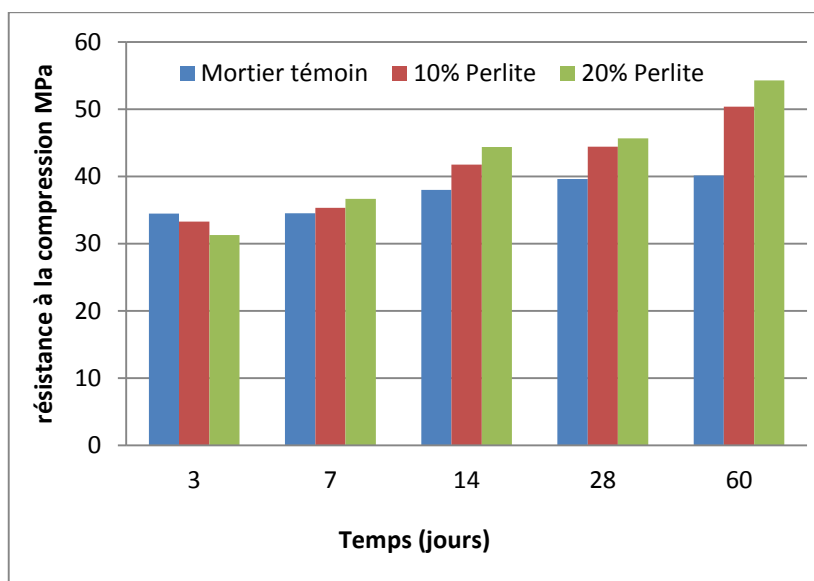


Figure III.6 : Evolution des résistances à la compression (MPa).

L'analyse de la figure III.6 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 60jours).

Ce gain de résistance peut être attribuée 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.

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 20% de perlite améliore les résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers au jeune âge (7 jours) et à long terme (60 jours).

Pour l'absorption capillaire, le mortier témoin à absorbé une quantité d'eau importante par rapport au mortier à base de 10 20 % da perlite. Cela est dû au remplissage des pores capillaires de la matrice cimentaire par la perlite et les sont ainsi réduites.



Conclusion générale et perspectives



CONCLUSION GENERALE

Ce travail expérimental a pour objectif la valorisation d'un ajout pouzzolanique naturel : la perlite de Maghnia en étudiant les avantages et la possibilité de le substituer partiellement au ciment à divers pourcentages (0%,10% et 20%). L'influence de la perlite sur le comportement mécanique et les propriétés physiques des mortiers dans lesquels elle est incorporée, est étudiée.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que la quantité d'ajout pouzzolanique, sa composition chimique et la composition chimique du ciment sont les principaux paramètres qui influent sur la variation des résistances mécaniques (compression) des mortiers testés.

En étudiant l'influence de la perlite naturelle de Maghnia sur les caractéristiques physico-mécaniques des pâtes et mortiers, on est arrivé aux conclusions suivantes :

- Le ciment incorporant cette perlite demande plus d'eau pour que sa pâte atteigne une consistance normale.
- L'ajout de perlite naturelle dans le ciment accélère les temps de début et de fin de prise des pâtes.
- On en déduit qu'une 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.

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 10 et 20%, qui ont tout de même l'avantage d'atteindre des performances acceptables du point de vue de la résistance à la compression.

PERSPECTIVES

En Algérie, la perlite naturelle de Maghnia est un matériau méconnu par les différents acteurs de l'industrie cimentière ou de la construction. À partir de ce constat et suite à notre travail, on peut envisager de nombreuses perspectives de recherche, qui peuvent aider à mieux connaître et à maîtriser d'avantage l'utilisation de ce matériau pour la fabrication des matériaux cimentaires.

Premièrement, les perspectives visant à mieux connaître les effets de l'ajout de la perlite naturelle dans le ciment sur les performances physico-mécaniques des matériaux cimentaires peuvent être résumées dans ce qui suit:

- L'influence de la variation de sa finesse.
- Etude de l'effet de la perlite de différentes finesses à l'état frais (rhéologie) et durci (comportement mécanique et retrait).
- Elargir la recherche sur les mortiers à base de perlite par l'étude de leur durabilité

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.



Références bibliographiques

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

A Kerbouche, M. Mouli, L. Laoufi, Y. Senhadji, S. Benosmane., 2017 : «Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers », (Faculté des sciences, Laboratoire de Chimie des Polymères, Université d’Oran, Es-sénia, Oran).

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.

Batis G., Pantazopoulou P., Tsvivilis S., 2005 : « The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars ». Cem. Concr.Compos. Vol. 27, p. 125–130.

Belaribi O., 2015 : « Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzolane », Thèse de doctorat, **Université** de Mostaganem, 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.

Brooks J., Johari M., Mazloom M., 2000 : « Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete », Cem. Concr. Compos. Vol. 22, p. 293–301.

Centre D'information Sur Le Ciment Et Ces Application., 1997 : « Fiche techniques: le ciment et ces application », collection Cimbeton, paris 1997.

Chicouche H., 2000 : « influence de l'ajout pouzzolanique (argile cuite) sur les caractéristiques physico-chimiques des ciments », Thèse de Magister, Département de Génie Civil de l'Université de « MOHAMED BOUDIAF » de M'sila.2000.

Cours Universite De Sherbrooke : Les ajouts dans le ciment **GCI 712 CH.7.**

Day R.L., Shi C., 1994a : « Influence of the fineness of pozzolan on the strength of lime natural pozzolan cement pastes », Cement and Concrete Research, Vol. 24(8), p. 1485-1491.

Day R.L., Shi C., 1994b : « Effect of initial water curing on the hydration of cements containing natural pozzolan », Cement and Concrete Research, Vol. 24, N° 3, p. 463-472.

Djobo Y., 2007 : « effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les propriétés de ciments gépolyinères 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.

Ferk A., Leonhardt R., Denton J., Tuffen H., Hess K.U., Dingwell D.B., 2012 : « Paleointensity on volcanic glass of varying hydration states» , Physics of the Earth and Planetary Interiors, p.25-37.

G. Habert , N. Choupay, Jm Montel, D.Guillaume, G.Escadeillas., 2008 : «Effects of the secondary minerals of the natural pozzolana on their pozzolanic activity» , Cement and Concrete Research 38 pp 963-975; 2008.

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 coules 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

Herskovitch D., Lin I.J., 1996 : « Upgrading of raw perlite by a dry magnetic technique », Magnetic and Electrical Separation, OPA, Vol.7, p. 145-161.

Lafarge : <https://www.lafargeholcim.ma/fr/ciment>.

Hanafi I., 2012 : « étude de l'influence des ajouts cimentaires sur l'activité pouzzolanique des mortiers » .

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

J.C.Langford., 1979 : identification de la perlite en tant que verre volcanique.

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.

Naik T.R., Singh S.S., Ramme B.W., 2001 : Time of setting influenced by inclusion of fly ash and chemical admixtures, 7th International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete (CANMET/ACI):

Proceedings, vol. 1. Ed. by V.M. Malhotra. July 22–27, 2001, Madras, India, p. 393–413.

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

Ollivier., 2008 : « L'hydratation des ciments, La Durabilité des Bétons», Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Sous la direction de Jean-Pierre Ollivier et Angélique Vichot.

ORGM., 2001 : Carte des Potentialités Minières. Office National de Recherche Géologique et Minière, Boumerdes, Algérie.

P.C. Aitcin., 1968 : «les propriétés minéralogiques des sables de laitier de haut fourneau de fontethomas et leur utilisation dans les mortiers en béton », Revue des matériaux de construction. Mai1968

L.Day., 1990 : « pozzolans for use in low-cost» a state of the art report prepared for the international development research centre ottawa, canada.department of civil engineering, university of calgary. september, 1990.

S. Donatello, M. Tyrer, C.R. Cheeseman., 2010 : « Comparison of test methods to assess pozzolanic activity» Cement &Concrete Composites, journal homepage: www.elsevier.com/locate/cemconcomp,32 (2010) 121–127.

Senhadji Y., 2013 : « L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers visà- vis des attaques chimiques (acides et sulfates) », Thèse de doctorat, Université de sciences et de la technologie d'Oran MB, Algérie.

The Cement Association Of Canada : les ciments avec ajouts.

Thibaut P.M., Coumoul A., 2003 : Mémento roches et minéraux industriels: la perlite. BRGM/RP-50469-FR, France. Universitaires. mars, 2003.

NORME NF EN 196-1 : les operations 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.

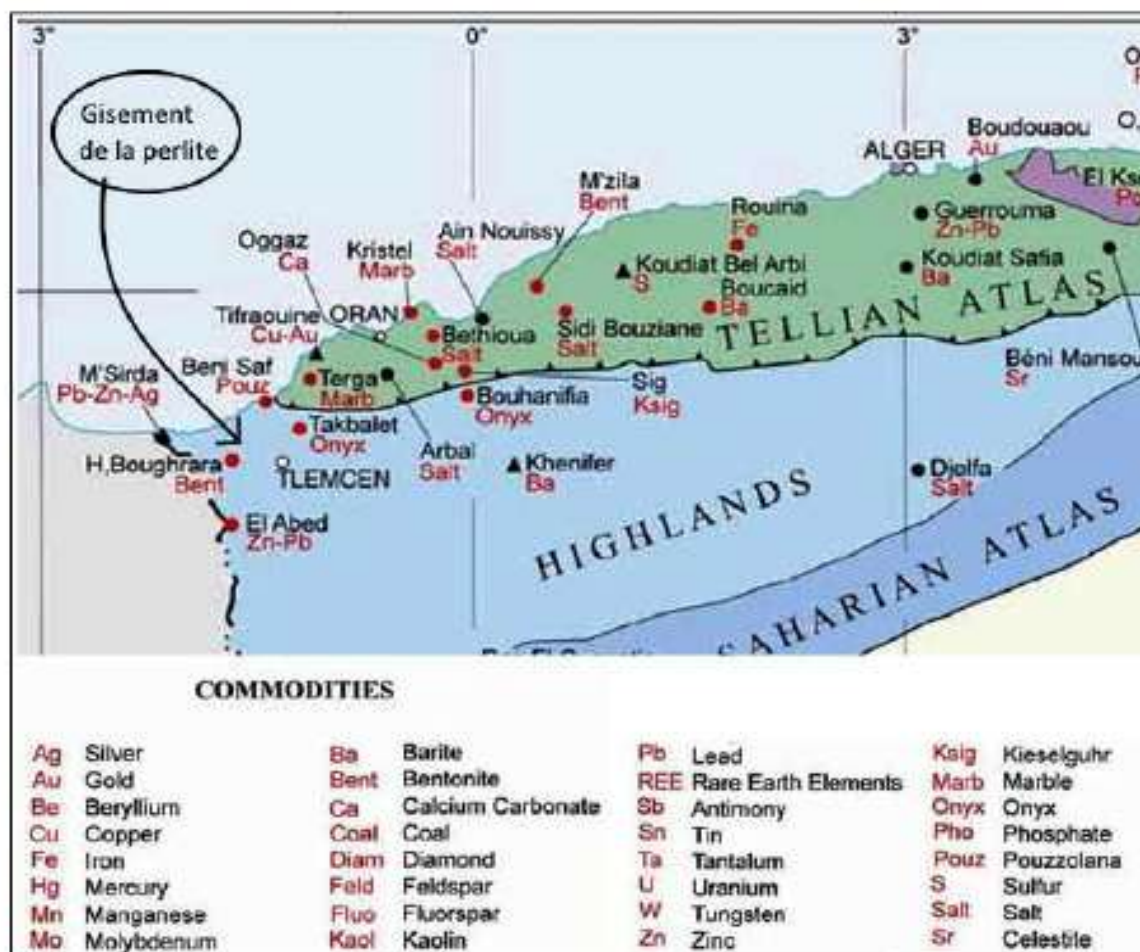
NORME NFP 18-555 : La masse volumique absolue du ciment et perlite.



LES
ANNEXES

Annexe B

Localisation du gisement de la perlite naturelle au Nord Ouest algérien dans la carte des potentialités minières, établie par l'office national de recherche géologique et minière (ORGM) [ORGM 2001].



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

SIKAPLAST® BV 40 + permet d'obtenir des bétons plastiques ayant de fortes résistances mécaniques à court et à long terme.

- bétons à hautes performances,
- bétons précontraints,
- bétons préfabriqués étuvés.
- bétons avec des granulats concassés,
- bétons retarder en surdosage.

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.

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.

Le SIKAPLAST® BV 40 + est compatible avec nos entraîneurs d'air SIKA AER et SIKA AER5. Cette combinaison conduit à :

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

Caractères généraux

SIKAPLAST® BV 40+ est un plastifiant réducteur d'eau à haute performance qui confère au béton les propriétés suivantes :

- haute réduction d'eau,
- maintien prolongé de la rhéologie,
- robustesse vis-à-vis de la ségrégation,
- bel aspect de parement au décoffrage.

CLASSIFICATION 3R



Caractéristiques

Aspect

Liquide marron

Conditionnement

- 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 Na ₂ O 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 SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA 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 renseignements. 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



ALGÉRIE



متين Matine

LAFARGE
Construire
des villes meilleures™



Ciment pour béton exigeant

CPJ - CEM II/B 42.5 N

Matine Ciment gris pour bétons de haute-performance destiné à la construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments

Matine

CPJ - CEM II/B 42.5 N.

Matine est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA 442) et Européenne (EN 197-1)

AVANTAGES PRODUIT











- Une résistance initiale élevée pour vos ouvrages nécessitant un décoffrage rapide
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie
- Une Classe Vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité du béton.

APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments
- Préfabrication légère
- Béton de haute performance



FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment 	Sable (sec) 	Gravillons (sec) 		Eau (litres) 
		0/5	8/15mm	15/25mm	
Dosage pour béton c25/30	X 1 	+ X7 	+ X5 	+ X4 	+ 25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

• Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	10.0±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7±0.5
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	0.02-0.05

• Composition minéralogique du Clinker (Bogue)

	Valeur
C3S (%)	60±3
C3A (%)	7.5±1

• Propriétés physiques

	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3.0

• Temps de prise à 20° (NA 230)

	Valeur
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50

• Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

1- **PROTÉGEZ VOTRE PEAU** : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- **MANUTENTION** : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



LAFARGE ALGÉRIE

Centre commercial Bab Ezzouar, Tour n°02,
Etages 05 & 06, Bab Ezzouar Alger, Algérie

Tél: + 213 (0) 21 98 54 54

Fax: + 213 (0) 23 92 42 94

www.lafargealgerie.com

 **LAFARGE**
لافارج