

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique
جامعة غرداية
Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil



Mémoire
Présenté pour l'obtention du diplôme **de Master**
En : Génie Civil
Spécialité : Structure

Par : BENKOUMAR Abderrahmane
BOUFRIKECHE Abdelkader

Sujet

**Influence de la bentonite calcinée sur les propriétés
des mortiers cimentaire**

Jury composé de :

A. BAHAZ	Univ. Ghardaia	Examineur
SAITI ISSAM	Univ. Ghardaia	Examineur
M N. AZIEZ	MAB Univ. Ghardaia	Encadrant

Année Universitaire : 2021/2022

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu Tout-Puissant d'avoir facilité notre arrivée pour terminer cet humble travail

*La première personne que nous tenons à remercier est le professeur **AZIEZ Med Nadjib** d'avoir accepté de nous encadrer et l'aide précieuse, et sa présence constante, les conseils avisés et ses remarques importantes qu'il nous a fournis tout au long de ce projet.*

Merci et encore merci nos professeurs qui ont contribué à notre apprentissage et à notre savoir depuis l'école primaire jusqu'à l'université.

Nous adressons également nos sincères remerciements à tous les travailleurs du laboratoire des travaux publics du sud Ghardaïa (LTPS), Ceux qui se sont tenus à nos côtés et nous ont donné des conseils et des orientations dans notre thème de recherches,

Nous remercions également les membres de comité correction qui ont accepté d'examiner notre travail.

Enfin, un merci spécial et personnel à tous les membres de nos familles, Professeurs d'université et tous nos amis et nos camarades de classe, les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DEDICACES

Je dédie d'abord ce modeste travail à mes parents, pour leurs incessants encouragements.

Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A mes frères et mes sœurs À tous les membres de la famille

à Mon amis à tous mes proches

À chaque professeur qui m'a a appris.

A tous ceux qui nous connaissent.

Et ne nous épargnent pas leurs sourires.

A tous sans exception.

Avec le plus grand respect et appréciation.

BENKOUMAR Abderrahmane

DEDICACES

Je tiens C'est avec grande plaisir que je dédie ce modeste travail :

A l'être le plus cher de ma vie, ma mère.

A celui qui m'a fait de moi un homme, mon père.

A Mes chers frères et Sœurs.

À tous les professeurs qui m'ont appris.

*A tous mes amis de promotion de 2ème année Master GC
structure, toute personne qui occupe une place dans mon cœur.*

*A tous les membres de ma famille et toute personne qui porte le
nom **BOUFRIKECHE**.*

Je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite.

BOUFRIKECHE Abdelkader

RESUME

La recherche actuelle sur les matériaux s'intéresse au développement de nouveaux composites cimentaires dont dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques, physiques permettant de réduire la consommation d'énergie, qui se traduit par la diminution du taux de gaz carbonique dégagé par les fours industriels. La présente étude a pour but d'évaluer expérimentalement l'influence de la substitution d'une partie de ciment par des poudres de bentonite calcinée et filler calcaire dans les mortiers sur les propriétés physiques mécaniques (la résistance à la flexion et à la compression).

Nous avons préparé des éprouvettes de mortiers par la substitution de ciment avec différents pourcentages en deux ajouts de poudre de bentonite calcinée et filler calcaire (5, 10, 15%). Les résultats de notre étude montrent que la substitution d'une partie de ciment avec deux ajouts des poudres de bentonite calcinée et des fillers calcaires améliorent les caractéristiques des mortiers à l'état durci.

Mots clés : Absorption capillaire, bentonite calcinée, compression, filler calcaire, flexion, mortier.

ملخص

تهتم الأبحاث الحالية حول المواد بتطوير مركبات اسمنتية جديدة ، بهدف تحسين الخواص الميكانيكية والفيزيائية مما يسمح بتقليل استهلاك الطاقة ، مما يؤدي إلى تقليل معدل ثاني أكسيد الكربون المنبعث من الأفران الصناعية. الغرض من هذه الدراسة هو إجراء تقييم تجريبي لتأثير استبدال جزء من الإسمنت بمساحيق البنتونايت المكلس وحشو الحجر الجيري في الملاط على الخواص الفيزيائية الميكانيكية (مقاومة الانحناء والضغط).

قمنا بإعداد عينات اختبار من الملاط باستبدال الإسمنت بنسب مختلفة في اثنين من الإضافات مسحوق البنتونايت المكلس وحشو الحجر الجيري (5 ، 10 ، 15%).

تظهر نتائج دراستنا أن استبدال جزء من الإسمنت بإضافتين من مساحيق البنتونايت المكلس وحشو الحجر الجيري يحسن خصائص الملاط في الحالة الصلبة.

كلمات مفتاحية:

حشو الحجر الجيري ، البانتونايت المكلس ، ملاط ، ضغط ، ثني ، امتصاص شعري

ABSTRACT

Current research on materials is interested in the development of new cementitious composites, with aiming to improve the mechanical and physical properties allowing reducing the energy consumption, which results in the reduction of the carbon dioxide rate emitted from industrial ovens. The main objective of this thesis is to study experimentally the influence of the substitution of a part of cement by calcined bentonite powders and limestone filler in mortars on the mechanical and physical properties (bending and compression resistances).

Test specimens of mortars are prepared by substituting cement with different percentages in two additions calcined bentonite powder and limestone filler (5, 10, 15%).

As a result of this study, the characteristics of mortars in the hardened state are improved by the substitution of a part of cement with two additions calcined bentonite powders and limestone fillers.

Keywords: bending, capillary absorption, calcined bentonite, compression, limestone filler, mortar,

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.	I
DEDICACES	II
RESUME	IV
ملخص	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIERES	VII
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XII
INTRODUCTION GENERALE	1
CONTEXTE	3
REFERENCES	4
CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	5
I.1 Introduction :	5
I.2 Définition du ciment portland :	5
I.2.1 Type de Ciment :	6
I.2.1.1 Ciment Portland artificiel (CEM I):	6
I.2.1.2 Ciment portland composé (CEM II) :	6
I.2.1.3 Ciment de haut fourneau CEM III :	7
I.2.1.4 Ciment pouzzolaniques CEM IV:	7
I.2.1.5 Ciment composé CEM V: (anciennement ciment de laitier au clinker) :	7
I.2.2 Les types de ciments selon la norme NF EN 197-1 :	7
I.3 Hydratation du ciment :	8
I.3.1 Introduction :	8
I.3.2 Hydratation des silicates de calcium, C3S et C2S :	8
I.3.3 Hydratation des aluminates de Calcium, C3A et C4AF :	9
I.3.3.1 Hydratation de l'aluminate tricalcique C3A :	9
I.3.3.2 Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C4AF :	10
I.4 Réactivité des autres constituants du ciment (les additions minérales) :	10
I.4.1 La pouzzolane :	10
I.4.2 Laitier des hauts-fourneaux :	11
I.4.3 Fumées de silice :	12
I.4.4 Calcaire :	13
I.5 Bentonite :	13
I.5.1 Définitions :	13
I.5.2 Origine de la bentonite :	14
I.5.3 Types de bentonite :	14
I.5.4 Utilisations de la bentonite :	15

TABLE DES MATIERES

I.6	Fillers :	15
I.6.1	Définition :	15
I.6.2	Propriétés Requises Du Filler Calcaire :	16
I.6.3	L'utilisation Des Fillers Calcaires :	16
I.6.4	Différents types de calcaire :	17
I.6.5	Propriétés et mode d'action des fillers :	17
I.7	Argiles :	18
I.7.1	Les grandes familles de minéraux argileux :	18
I.7.2	Classification des argiles :	19
I.7.3	Différents types d'argile :	20
I.7.4	Espèces de minéraux argileux :	22
I.7.5	Les minéraux à pseudo-feuillets et à faciès fibreux :	22
I.7.6	Relation entre la taille des particules fines et leurs natures minéralogiques :	23
I.7.7	Activation thermique :	23
I.7.8	Activation chimique :	23
I.8	Argiles Calcinées :	24
I.8.1	Mode d'obtention :	24
I.8.2	Composition minéralogique :	25
I.8.3	Domaine d'utilisation :	26
I.8.3.1	Matériaux de construction :	26
I.8.3.2	Utilisation générales :	26
I.8.4	Rôle de l'argile calcinée :	27
I.8.5	Réactivité pouzzolaniques des argiles calcinées :	28
I.9	Mortiers :	28
I.9.1	Définition :	28
I.9.2	Les différents types de mortiers :	28
I.9.2.1	Les mortiers de ciment :	28
I.9.2.2	Les mortiers de chaux :	28
I.9.2.3	Les mortiers bâtards :	29
I.10	Conclusion :	29
REFERENCES		30
CHAPITRE II : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES		34
II.1	Introduction :	34
II.2	Caractérisation des matériaux utilisés :	35
II.2.1	Ciment :	35
II.2.2	Sable :	35
II.2.2.1	Analyse Granulométrique :	36
II.2.2.2	Equivalent de Sable :	38
II.2.2.3	Masse volumique apparente :	39
II.2.2.4	Teneur en eau :	40
II.2.2.5	Caractérisation chimique de Sable :	41

TABLE DES MATIERES

II.2.3	Bentonite :	42
II.2.3.1	Préparation de la bentonite :	42
II.2.3.2	Caractérisation chimique de Bentonite :	46
II.2.4	Filler Calcaire :	47
II.2.4.1	Préparation de Filler calcaire :	47
II.2.4.2	Caractérisation chimique de Filler calcaire :	49
II.2.5	L'eau :	50
II.3	Méthode de formulation du mortier cimentaire :	50
II.4	Méthodes expérimentales :	51
II.4.1	Variation de la masse :	51
II.4.2	Essai de Flexion :	52
II.4.3	Essai de Compression :	52
II.4.4	Absorption capillaire :	53
II.4.5	Porosité accessible à l'eau :	55
II.5	Conclusion :	55
CHAPITRE III : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS		56
III.1	Introduction	56
III.2	La masse volumique :	56
III.3	Résistance de traction par flexion :	58
III.4	Résistance à la compression :	59
III.5	Absorption capillaire :	61
III.5.1	Résultats et discussion de l'essai d'absorption capillaire du mortier (7 jours) :	61
III.5.2	Résultats et discussion de l'essai d'absorption capillaire du mortier (14 jours) :	62
III.5.3	Résultats et discussion de l'essai d'absorption capillaire du mortier (30 jours) :	63
III.6	Porosité accessible à l'eau :	64
III.7	Conclusion	65
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES		66
ANNEXE A		68
ANNEXE B		70
ANNEXE C		71

Liste Des Figures

INTRODUCTION GENERALE

Figure 1 : Émission de dioxyde de carbone d'une cimenterie dans l'État de M'sila. [5] 2

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I.1 : C-S-H fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des C-S-H , La porosité est repérée par (O). [12] 8

Figure I.2 : Microscopie Electronique à Balayage, ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton. [14] 9

Figure I.3 : pouzzolane naturelle. [17] 10

Figure I.4 : Pouzzolane artificielle : (a) Kaolin ; (b) Métakaolin. 11

Figure I.5 : Poudre de Fumées de silice. [20] 13

Figure I.6 : Fumée de silice vue au microscope. [21] 13

Figure I.7 : Bentonite Calcinée. 14

Figure I.8 : Illustration de l'effet filler. 17

Figure I.9 : Constitution d'un tétraèdre et d'un octaèdre. [40] 19

Figure I.10 : Notion de feuillet, inter feuillet (structure) et de distance réticulaire d pour un minéral de type 1:1 (groupe de kaolinite $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). [40] 19

Figure I.11 : Minéraux argileux de type 1:1. 20

Figure I.12 : Minéraux argileux de type 2:1. 21

Figure I.13 : Minéraux argileux de type 2:1:1. 21

Figure I.14 : Minéraux argileux interstratifiés régulier et irrégulier 22

Figure I.15 : Les différents types de mortiers. [69] 29

CHAPITRE II : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

Figure II.1 : Sac de Ciment CEM I/A 42.5. 35

Figure II.2 : Sable Oued M'zi Laghouat. 35

Figure II.3 : L'analyse Granulométrique. 36

Figure II.4 : Courbe distribution granulométrique. 37

Figure II.5 : Processus de L'essai d'équivalent de Sable. 39

Figure II.6 : Récipient Rempli par le Sable. 40

Figure II.7 : Bentonite après le séchage. 43

Figure II.8 : Appareil Micro-Deval.	43
Figure II.9 : la bentonite et les boulets sphériques.	44
Figure II.10 : les boulets à mélanger avec la 44	44
Figure II.11 : Time-tronic.	45
Figure II.12 : la bentonite après un broyage mécanique.	45
Figure II.13 : Four à moufle.	45
Figure II.14 : Bentonite broyée.	46
Figure II.15 : Bentonite Calcinée.	46
Figure II.16 : Limestone (filler calcaire).	48
Figure II.17 : filler calcaire après le séchage.	48
Figure II.18 : la filler calcaire et les boulets sphériques.	49
Figure II.19 : Eau Déminéralisée.	50
Figure II.20 : Mortier Cimentaire.	51
Figure II.21 : Eprouvettes Mortiers de Ciment.	51
Figure II.22 : Balance de 0.01 g.	52
Figure II.23 : Dispositif de Résistance à la Flexion.	53
Figure II.24 : Dispositif de résistance à la compression.	53
Figure II.25 : L'essai d'absorption Capillaire.	55
Figure II.26 : Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire.	55
Figure II.27 : Etuve petit model 500 °C.	56
Figure II.28 : Dispositif de Mesure de la Porosité accessible à l'eau.	57

CHAPITRE III : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

Figure III.1 : Evolution de masse volumique pour le mortier en fonction de temps.	59
Figure III.2 : Evolution de la résistance à la flexion pour le mortier en fonction de temps. ...	60
Figure III.3 : Evolution de résistance à la compression pour mortier en fonction de temps. ..	62
Figure III.4 : Absorption d'eau capillaire par unité de surface de mortier (7 jours).	63
Figure III.5 : Absorption d'eau capillaire par unité de surface de mortier (14 jours).	64
Figure III.6 : Absorption d'eau capillaire par unité de surface de mortier (30 jours).	65
Figure III.7 : Porosité accessible à l'eau.	66

Liste Des Tableaux

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I.1 : différents types de ciment selon la norme NF EN 197-1 [9].....	7
Tableau I.2 : Relation entre la taille et la nature de minéraux. [49]	23

CHAPITRE II : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

Tableau II.1 : Un tableau représentant les pourcentages de matériaux utilisés.....	34
Tableau II.2 : Un tableau représentant l'essai qui a été effectués.....	34
Tableau II.3 : Analyse granulométrique du sable Oued M'zi (Laghout).	37
Tableau II.4 : Résultats Equivalent de sable.	39
Tableau II.5 : Valeur Préconisée pour L'équivalent de Sable.....	39
Tableau II.6 : Masse Volumique Apparente du Sable Oued M'zi (Laghout).	40
Tableau II.7 : Teneur en Eau du Sable Oued M'zi (Laghout).	41
Tableau II.8 : Composition chimique de Sable. (Annexe C)	42
Tableau II.9 : Composition chimique de Bentonite. (Annexe C).....	47
Tableau II.10 : Composition chimique de filler calcaire.	50

CHAPITRE III : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

Tableau III.1 : Un tableau représentant les pourcentages de matériaux utilisés.	58
Tableau III.2 : Les résultats de masse volumique pour mortier en fonction de temps.....	59
Tableau III.3 : Résultats essai de traction par flexion.	60
Tableau III.4 : Résultats d'essai compression.	61
Tableau III.5 : Absorption d'eau capillaire par unité de surface de mortier (7 jours).	63
Tableau III.6 : Absorption d'eau capillaire par unité de surface de mortier (14 jours).	64
Tableau III.7 : Absorption d'eau capillaire par unité de surface de mortier (30 jours).	65
Tableau III.8 : Résultats en Porosité accessible à l'eau.	66

INTRODUCTION GENERALE

En 2001, le rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement en Algérie a mis en évidence le fait que le pays est face à une crise écologique sans précédent (MATE, 2001). Des problèmes tels que la déforestation, la dégradation de la biodiversité, la perte de fertilité des sols, la prolifération des déchets, l'épuisement des ressources rares, etc. ont directement impacté l'activité et l'efficacité économiques, mais également la santé et la qualité du cadre de vie de la population. Ainsi, la dégradation des forêts, des sols et de la biodiversité affecte la productivité agricole et la qualité des écosystèmes. La pollution des ressources en eau est la cause de maladies hydriques et est à l'origine de la dégradation des écosystèmes aquatiques se répercutant sur les ressources halieutiques. La pollution de l'air provoquée par les activités industrielles et le transport a des répercussions importantes sur la santé publique (maladies respiratoires, allergies, etc.) [1, 2, 3,4].

Le ciment est nécessaire à la fabrication du béton. En termes d'énergie nécessaire à sa production, le ciment se classe au troisième rang de tous les matériaux, devancé seulement par l'acier et l'aluminium. Cette situation doit être prise au sérieux car le béton est appelé à jouer un rôle de plus en plus important dans le développement et le maintien de l'activité humaine.



Figure 1 : Émission de dioxyde de carbone d'une cimenterie dans l'État de M'sila [5].

La production de ciment représentant 5% des émissions mondiales de dioxyde de carbone [6] étant sa principale source. Cela est dû, d'une part, à la forte intensité énergétique du processus de production de clinker Portland La production d'une tonne de clinker nécessite un apport de 3,1 à 3,8 GJ de chaleur, alors que dans les fours à méthode humide de l'ancienne génération, la demande peut même atteindre 6 GJ / t [6]. En revanche, lors de la production de ciment, le dioxyde de carbone est émis par les matières premières, principalement le calcaire.

La quantité de cette émission est d'environ 0,53 kg / kg de clinker [6].

Pour cette raison, il est devenu nécessaire de rechercher un liant moins cher et disponible en utilisant certains déchets et ressources naturelles pouvant être obtenus gratuitement, tels que (charge calcaire, pouzzolane (ajouts minéraux), le laitier de haut fourneau, le fumé de silice, le filler calcaire, poudre de marbre, Les argiles calcinée, poudre de verre, comme produits de remplacement partiel du ciment Portland dans le mortier et béton.

L'argile calcinée et le filler calcaire peuvent-elles être utilisées comme produits de remplacement partiel du ciment Portland ?

Objectifs de l'étude :

La présente étude a pour but d'évaluer expérimentalement l'influence de la substitution d'une partie de ciment par des pourcentages des bentonite et des fillers calcaires (5%, 10%,15%) dans les mortiers sur les propriétés physiques mécaniques (la résistance à la flexion et à la compression) dans (7, 14 ,28) jours.

CONTEXTE :

Cette étude est divisée en 3 chapitres structurés comme suit :

- Le premier chapitre sera consacré à la synthèse bibliographique sur le ciment et des minéraux argileux et types des ajouts minéraux différents et les mortiers.
- Le deuxième chapitre en contient matériaux et procédures expérimentales particulier la caractérisation des matériaux utilisés et les méthodes expérimentales dans la confection des mortiers par différents mélanges.
- Le troisième chapitre contient la présentation et discussion des résultats concernant l'état durci des différents mortiers étudiés. Tous les résultats font l'objet des commentaires et des interprétations. Les résultats concernant, la masse volumique, porosité accessible à l'eau, l'absorption d'eau et le comportement mécanique (les résistances en compression, traction et en flexion).

En fin une conclusion générale sur cette étude, des perspectives et des recommandations sont présentées.

REFERENCES :

- [1] Ramade, F., 2007, Introduction à l'écotoxicologie, Fondements et explications, TEC & doc Lavoisier, Paris-Sud, 618 p.
- [2] Ronneau, C., 2004, Énergie, pollution de l'air et développement durable. Presses universitaires de Louvain, Louvain-La-Neuve, 304 p.
- [3] Leguay, J. P., 1999, La Pollution au Moyen-Âge, Ed. Broché, Paris, 127 p.
- [4] Bugge, H. C., 1976, La pollution industrielle : problèmes juridiques et administratifs, PUF, Paris, 301 p.
- [5] <https://radioalgerie.dz/news/ar/article/20150401/35577.html>
- [6] Damtoft, J.S.; Lukasik, J.; Herfort, D.; Sorrentino, D.M.; Gartner, E.M. Sustainable development and climate change initiatives. *Cem. Concr. Res.* **2008**, 38, 115–127.

CHAPITRE I ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction :

Le mortier est un matériau de construction, qui contient du ciment, de l'eau, du sable, des adjuvants et éventuellement des additions. Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure [1].

L'étude du comportement du mortier est plus complexe que celui de la pâte. Sa théorie est encore peu explorée et nécessite plus d'investigation et de recherches théoriques et expérimentales. Bien que cette étude ait été faite dans un système de mortier, il est raisonnable de penser que les tendances qui ont été observées pourraient être prolongées au béton [2].

A l'origine, un mortier est un simple mélange entre un liant (en général du ciment) et du sable, gâché avec de l'eau. Néanmoins, au cours des dernières années, les mortiers sont devenus de plus en plus complexes, du fait de l'ajout de multiples adjuvants. Ils font dorénavant intervenir plus d'une dizaine de composants.

Les mortiers sont maintenant présents dans tous les secteurs du BTP. Leur utilisation n'a fait qu'augmenter depuis 1970 pour arriver à une production proche de 4 millions de tonnes en 2011. De plus, la complexité des mortiers entraîne une augmentation constante des mortiers pré-formulés, dits « industriels » ou « prêts à l'emploi », face aux mortiers réalisés sur chantier. L'emploi d'adjuvants permet d'obtenir diverses propriétés à l'état frais ou durci, selon l'application finale et les performances souhaitées. Néanmoins, la formulation des mortiers étant fondée fortement sur l'empirisme, l'emploi et le dosage des adjuvants sont souvent mal maîtrisés [3].

I.2 Définition du ciment portland :

Grâce à la simplicité de sa technologie, le ciment Portland est, de nos jours, le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction. Le ciment Portland est un mélange composé suivant le cas de clinker, de gypse CaSO_4 finement broyé et d'additions éventuels. Pour favoriser les réactions chimiques ultérieures, les matières premières doivent être séchées et

broyées très finement dans des broyeurs à boulets. La taille des grains du ciment Portland ordinaire varie de quelques microns à 150 microns. Ses caractéristiques granulaires sont exprimées au travers de sa granulométrie et de sa finesse. Cette finesse est souvent caractérisée par sa surface massique où surface spécifique Blaine qui représente la surface totale des grains de ciment rapportée à la masse. Elle s'exprime en cm^2/g . La finesse habituelle est de l'ordre de $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$, elle passe à $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ et plus pour les ciments à forte résistance au jeune âge. Le clinker est obtenu par cuisson { 1450°C suivi d'une trempe rapide d'un mélange d'environ 80% de calcaire (CaCO_3) et 20% d'argile. L'argile est composée de silice, d'alumine et d'autres phases qui sont présentes {de faibles proportions telles que l'oxyde de fer, le magnésium, l'oxyde de potassium, l'oxyde de sodium. Ces oxydes sont présents dans le clinker sous forme de cristaux de silicate tricalcique (C3S) dénommé alite, de silicate Bicalcique (C2S) ou Bélite, d'aluminate (C3A) ou Céliste, d'Alumino-ferrite tétra calcique (C4AF) ou Felite, et d'autres phases mineures. Le C3S est le principal constituant du clinker et représente 50 à 70% de sa masse. Le C2S, le C3A et le C4AF représentent respectivement 15 à 30%, 5 à 10% et 5 à 15% du clinker classique. Ces composées sont refroidies, broyées et mélangées au gypse pour former le ciment. Les paramètres de fabrication du ciment Portland ont une influence indéniable sur les caractéristiques du produit final. Ainsi, la vitesse avec laquelle les résistances du ciment hydraté vont augmenter avec le temps, le dégagement de chaleur concomitant, la résistance aux agents chimiques et plus généralement la durabilité, dépendent de:

- la composition chimique.
- Le traitement thermique (chauffage et refroidissement).
- La finesse du clinker [4] .

I.2.1 Type de Ciment :

I.2.1.1 Ciment Portland artificiel (CEM I):

C'est le produit résultant de la mouture de clinker, obtenu par la cuisson, dans des conditions de durée et de températures suffisantes, d'un mélange soigneusement homogénéisé et dosé, dont les principaux constituants sont : La silice, l'alumine, l'oxyde de fer et la chaux [5].

I.2.1.2 Ciment portland composé (CEM II) :

Les ciments portland composés contiennent au moins 65% de clinker, 5% de constituant secondaires, et des ajouts avec 30%. On a, par convention : (Clinker) + (autres constituants) + (constituants secondaires) = 100 [6].

I.2.1.3 Ciment de haut fourneau CEM III :

Le CEM III/A, B ou C ou ciment de haut-fourneau : Contient entre 36 et 80 % de laitier de haut-fourneau (S) et 20 à 64 % de clinker (K). Le CEM III/C (également dit ciment de haut-fourneau) contient au moins 81% de laitier haut fourneau (S) et 5 à 19 % de clinker (K) [7].

I.2.1.4 Ciment pouzzolaniques CEM IV:

Constitué d'un mélange de clinker, de pouzzolane et de cendre doit en plus satisfaire à l'essai de pouzzolanité» [8].

I.2.1.5 Ciment composé CEM V: (anciennement ciment de laitier au clinker) :

Il contient au moins 81% de laitier et 5 à 19% de clinker.

I.2.2 Les types de ciments selon la norme NF EN 197-1 :

Tableau I.1 : différents types de ciment selon la norme NF EN 197-1 [9].

Désignation	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants suivants : laitiers, schistes , pouzzolanes, cendres, calcaires et fumés de silice.	Teneur en secondaires
CEM I	Ciment portland Artificiel	95 à 100%	0%	0 à 5%
CEM II/A CEM II/B	Ciment portland composés	80 à 94% 65 à 79%	-de 6 à 20% de l'un des constituants dans le cas où le constituant est des fumés de silice auquel cas la proportion est limitée à 10% (*). -de 21 à 35% avec les mêmes restriction que ci-dessus(*).	0 à 5%
CEM III/A CEM III/B CEM III/C	Ciment de haut fourneau	35 à 64% 20 à 35% 5 à 19%	-de 36 à 65% de laitier de hauts fourneaux. -de 66 à 80% de laitier de hauts fourneaux. -de 81 à 95% de laitier de hauts fourneaux.	0 à 5%
CEM IV/A CEM IV/B	Ciment Pouzzola-nique	65 à 90% 45 à 64%	-de 10 à 35% de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumés de silice, ces dernières étant limités à 10%. -de 36 à 55% comme ci-dessus.	0 à 5%
CEM V/A CEM V/B	Ciments aux laitiers et aux cendres	40 à 64% 20 à 39%	-de 18 à 30% de laitier de hauts fourneau et 18 à 30% de cendre siliceuse ou de pouzzolane. -de 31 à 50% de chacun des constituants comme ci-dessus.	0 à 5%
(*) le pourcentage de fillers est limité à 5%				

I.3 Hydratation du ciment :

I.3.1 Introduction :

Le ciment est un liant hydraulique, il se combine à l'eau en donnant des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique. La réaction chimique d'hydratation du ciment conduit donc à la formation d'une pâte qui, après prise, durcit progressivement à l'air ou dans l'eau.

Les mécanismes fondamentaux de l'hydratation du ciment ont été mis en lumière, dès la fin du siècle dernier, par Henri Le Chatelier. Il a notamment décrit les trois phénomènes concomitants qui concourent au phénomène de prise [10] :

- la dissolution des constituants du ciment dans l'eau.
- la formation de solutions sursaturées par rapport aux différents hydrates.
- la précipitation et la cristallisation de ces hydrates dans les vides inters granulaires.

I.3.2 Hydratation des silicates de calcium, C_3S et C_2S :

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques (C_3S) et les silicates bicalciques (C_2S) se dissolvent sous forme d'ions Ca^{2+} , OH^- et $H_2SiO_4^{2-}$. Qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ($Ca(OH)_2$). Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du C_2S , la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de portlandite formée est plus faible [11]. À titre indicatif, les équations des réactions d'hydratation des silicates peuvent s'écrire :

Pour le C_3S : $2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$.

Pour le C_2S : $2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH$.

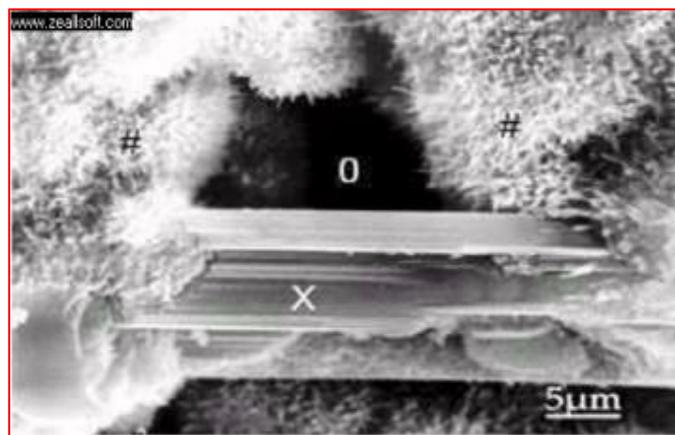


Figure I.1 : C-S-H fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des C-S-H , La porosité est repérée par (O) [12].

I.3.3 Hydratation des aluminates de Calcium, C3A et C4AF :

L'aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. C'est parce que l'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du sulfate sous forme de gypse au clinker pour contrôler ces réactions [13].

I.3.3.1 Hydratation de l'aluminate tricalcique C3A :

L'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). En l'absence du gypse, la réaction de C3A avec de l'eau est très violente et mène au raidissement immédiat de la pâte, connu sous le nom de prise rapide. En présence du gypse, les C3A réagissent d'abord pour former le trisulfoaluminate hydraté (Ettringite) qui se cristallise en aiguilles à base Hexagonale (figure 1.). La réaction est donnée par:

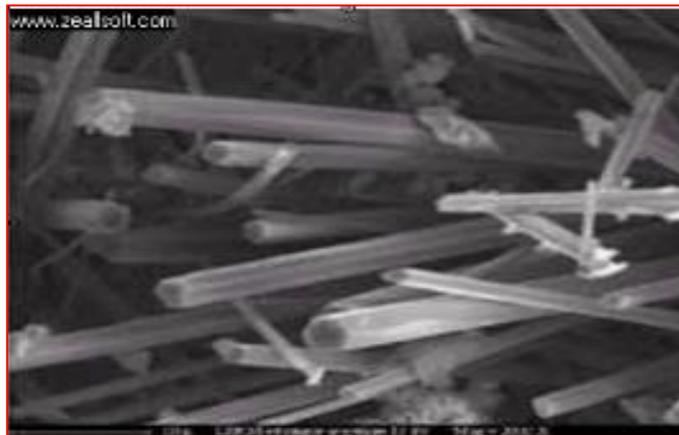
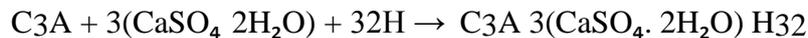


Figure I.2 : Microscopie Electronique à Balayage, ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton [14].

Le gypse ajouté au clinker (3 à 5% en poids) n'est pas en teneur suffisante pour transformer tous les aluminates en éttringite.

Il apparaît donc secondairement un monosulfoaluminate qui se cristallise en plaquettes hexagonales [15]. La réaction est donnée par :



Les aluminates hydratés ainsi obtenus occupent 15 à 20% du volume de la pâte de ciment complètement hydratée [13].

I.3.3.2 Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C4AF :

Le C4AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C3A, mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente.

Dans la première étape de la réaction, le C4AF produit une forme élevée de sulfoaluminate de calcium qui réagit avec l'excès de C4AF pour donner une basse forme de sulfoaluminate.

Ces sulfoaluminates occupent environ 15-20% du volume de solides dans la pâte.

La réaction du C4AF dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance [16]. L'hydratation des aluminates est de grande importance pratique parce qu'ils affectent les propriétés de prise du ciment.

I.4 Réactivité des autres constituants du ciment (les additions minérales) :

I.4.1 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 :

➤ Pouzzolane naturelle :

C'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 [17].



Figure I.3 : pouzzolane naturelle [17].

➤ Pouzzolane artificielle :

Tout comme la précédente, il s'agit d'un matériau composé, essentiellement, de silice, d'alumine et d'oxyde de fer mais qu'il a subi un traitement souvent thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles peuvent être des sous-produits comme la fumée de silice et les cendres volantes ou des matériaux issus d'un traitement approprié, notamment thermique. Parmi les matériaux traités thermiquement on cite: les argiles, schistes, latérite, bauxite, ...etc [18].

Les argiles calcinées sont des argiles qui ont subi un traitement sous des hautes températures, leur permettant d'avoir certains changements microstructuraux afin d'obtenir des propriétés pouzzolaniques. Parmi les argiles utilisées pour l'obtention des pouzzolanes artificielles on cite: les micas, la montmorillonite et la kaolinite. Le Métakaolin est une poudre de grande surface spécifique obtenue par calcination-broyage ou broyage-calcination d'une argile composée majoritairement de kaolinite. Le Métakaolin est constitué principalement de particule de silicate d'alumine amorphe ayant des propriétés pouzzolaniques. La température de calcination nécessaire pour l'obtention du Métakaolin varie entre 500 et 850 °C suivant la cristallinité et le degré d'ordre de la matière première (Kaolinite). Il se produit une réaction de déshydroxylation du matériau avec une destruction de la structure cristalline initiale conduisant à une nature amorphe du matériau.



Figure I.4 : Pouzzolane artificielle : (a) Kaolin ; (b) Métakaolin.

I.4.2 Laitier des hauts-fourneaux :

Les laitiers de hauts-fourneaux sont des coproduits de la fabrication de la fonte des usines sidérurgiques, ils sont formés de la gangue du minerai de fer, des fondants ajoutés, des impuretés du coke. Ce sont des silico-aluminates de calcium et de magnésium. La structure

minéralogique d'un laitier dépend de son mode de refroidissement. Plus rapide est le refroidissement (la trempe), plus vitreux est le laitier. Le laitier refroidi est en forme de granulés.

Le laitier granulé est utilisé en cimenterie, soit dans le cru en remplacement de l'argile (en particulier dans le procédé par voie sèche), soit au moment du broyage avec le clinker, le gypse comme ajout minéral. Ainsi donc le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été broyé séparément ou après avoir été co broyé avec le clinker. Il peut aussi être vendu séparément aux producteurs de béton qui l'introduise dans le béton comme ajout cimentaire [19].

I.4.3 Fumées de silice :

Sous-produit de la fabrication du silicium, du Ferro-silicium ou des silico-alliages. La fumée de silice est généralement grise foncé à noir ou blanc cassé. La fumée de silice est une poudre très fine constituée principalement de particules sphériques ou des microsphères de diamètre moyen d'environ 0.15 microns, avec une surface spécifique très élevée (15000- 25000 m²/kg). Chaque microsphère est en moyenne 100 fois plus petite qu'un grain de ciment moyen. Par exemple un dosage de 10% en masse de ciment, il y aura 50-100 mille particules de fumée de silice par grain de ciment.

Jusqu'en 1985, cette silice n'était pas valorisée. Ces "poussières" étaient d'abord rejetées dans l'atmosphère puis, pour protéger l'environnement, récupérées par filtration des fumées et placées en décharge.

Dans le béton durci, la fumée de silice améliore la résistance mécanique et la résistance aux cycles gel/dégel, d'un autre côté elle réduit l'action des attaques chimiques, la porosité et la perméabilité. Cette amélioration est due à l'accélération de la réaction d'hydratation et l'effet pouzzolanique [20].



Figure I.5 : Poudre de Fumées de silice [20].

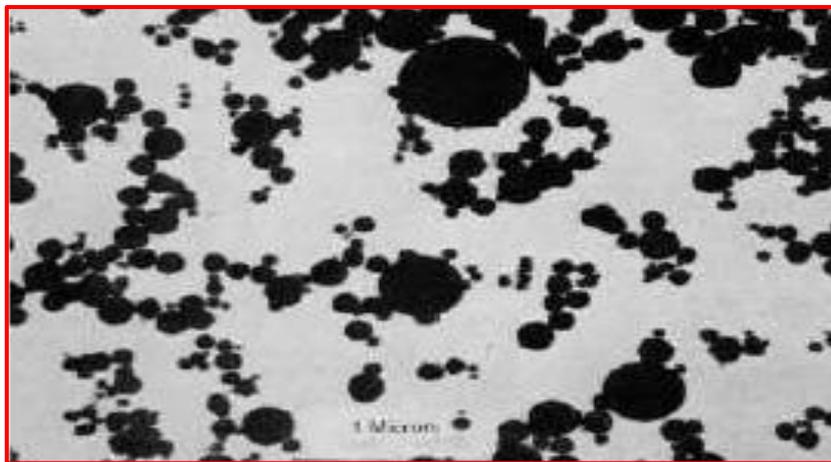


Figure I.6 : Fumée de silice vue au microscope [21].

I.4.4 Calcaire :

Le calcaire appartient aux roches carbonatées riches en chaux (CaCO_3), et il est contenu dans la calcite, l'aragonite ou la marne. Le calcaire constitue une matière première pour la fabrication du ciment. Des études ont montré certains avantages de l'utilisation du calcaire comme ajout et le remplacement du gypse. Les deux principales caractéristiques normalisées sont :

- Une teneur minimale en carbonate de calcium CaCO_3 .
- Une valeur minimale de l'indice d'activité [22].

I.5 Bentonite :

I.5.1 Définitions :

Le terme bentonite a été proposé en 1898 pour désigner une argile au toucher savonneux appartenant à la formation "Benton shale" et affleurant dans la région de Rock River

(Wyoming, Etats Unies) où la première exploitation de bentonite aurait été découverte en 1890. Cette formation tire son nom de Fort-Benton situé à 650 km environ au Nord de Rock River. Les bentonites sont des silicates d'alumine hydratés appartenant au groupe des Montmorillonite [23].

Selon la pharmacopée Européenne 2008 : C'est une argile naturelle contenant une forte proportion de montmorillonite, silicate d'aluminium hydraté d'origine naturelle, dans lequel certains atomes d'aluminium et de silicium peuvent être remplacés par d'autres atomes tels que le magnésium et le fer [24].



Figure I.7 : Bentonite Calcinée.

I.5.2 Origine de la bentonite :

L'altération et la transformation hydrothermale de cendres des tufs volcaniques riches en verre entraînent la néoformation des minéraux argileux, qui font partie principalement du groupe des smectites. Les roches argileuses ainsi formées portent le nom de bentonite, d'après le gisement situé près de Fort Benton (Wyoming, Etats-Unis). Elle contient plus de 75 % de montmorillonite ; cette dernière fut découverte pour la première fois en 1847 près de montmorillon, dans le département de la Vienne (France) [25].

I.5.3 Types de bentonite :

➤ **Il existe trois types de bentonites :**

- a) **Bentonite calcique :** Elles constituent la plus grande part de gisements exploités dans le monde. Elles contiennent essentiellement des ions (Ca^{2+}) en position interfoliaire. Ces argiles présentent un taux de gonflement de 3 à 7 fois le volume initial [23].

b) **Bentonite sodique** : Ce sont des argiles rares. Leur ion interfoliaire ou échangeable est Na^+ . Elles ont un pouvoir de gonflement très élevé (12 à 18 fois) [23].

c) **Bentonite de potassium** : Aussi connu sous le nom de bentonite de potasse ou de K bentonite, la bentonite de potassium est une argile illitique riche en potassium formée à partir d'une altération des cendres volcaniques [26].

I.5.4 Utilisations de la bentonite :

La bentonite est l'argile industrielle la plus importante en raison de son principal composant de montmorillonite qui lui confère une capacité d'absorption et de gonflement très élevées qui sont exploités dans différents domaines dont [27] :

- Protection environnementale.
- Forage.
- Les céramiques.
- Les peintures.
- L'agroalimentaire.
- Décoloration des huiles.
- Raffinage du pétrole.
- Additif dans la fabrication du papier.
- Génie civil (additif dans le ciment).
- Traitement des eaux usées.
- La pharmacie et la cosmétique.

Les bentonites sont largement utilisées dans l'industrie cosmétique et pharmaceutique en tant qu'excipient, ingrédients actifs et transporteur et libérateurs d'ingrédients actifs [28, 29], comme décrit plus en détail dans le titre suivant.

I.6 Fillers :

I.6.1 Définition :

Les normes Françaises (1979) définissent les fillers de la façon suivante : Produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basaltes, laitiers, cendres volantes..) naturels ou non. Le filler calcaire est un matériau très finement broyé, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns, ayant une finesse à peu près identique à celle du

ciment Portland. Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les graviers. Selon la norme NF P 15-301, la teneur en filler calcaire est limitée à 5 % de la masse du ciment. Compte tenu des liaisons électriques entre cations et anions rompus par broyage du clinker et du gypse, on trouve à la surface des grains de ciment des sites chargés électriquement. Ces grains sont généralement chargés négativement, selon Bomblet : [30]. IL y a trois fois plus de charges négatives que positives. Une des raisons qui motivent l'utilisation des fillers est la réduction du coût de production.

- **Rôle de remplissage** : l'amélioration de la compacité des mélanges par effet granulaire. Sa présence est complémentaire à celle du ciment pour combler les vides intergranulaires [31].
- **Rôle rhéologique** : par la réduction de la quantité d'eau pour une consistance donnée en améliorant la compacité du mélange frais et les résistances en compression aux jeunes âges du béton durci [32].
- **Rôle physico-chimique** : la présence des fillers calcaires dans un mélange cimentaire conduit à l'accélération du processus d'hydratation ou encore qu'elle permettait une meilleure dispersion des grains de ciment générant un accroissement du taux d'hydrates formés et une structuration de la matrice cimentaire plus efficace [33].
- **Rôle chimique** : par association avec les aluminates du ciment pour la formation de carboaluminates [34].

I.6.2 Propriétés Requises Du Filler Calcaire :

Un filler calcaire est une fine minérale obtenue par broyage d'une roche calcaire de manière à répondre aux critères de conformité de la norme sur les additions minérales calcaires (NF P18-508). L'appellation de filler calcaire vient du fait que cette addition, si elle est broyée assez finement, s'insère dans le squelette granulaire du ciment (Figure I.8) et permet donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes des mortiers (ciment, sable). L'effet, appelé effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

I.6.3 L'utilisation Des Fillers Calcaires :

L'utilisation des fillers calcaires dans l'industrie du ciment et du béton est assez récente. Ils sont soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires et peuvent alors contenir des résidus argileux et des matières organiques, soit obtenus par broyage du matériau cru. Leur

composition chimique est celle du carbonate de calcium (CaCO_3). 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.

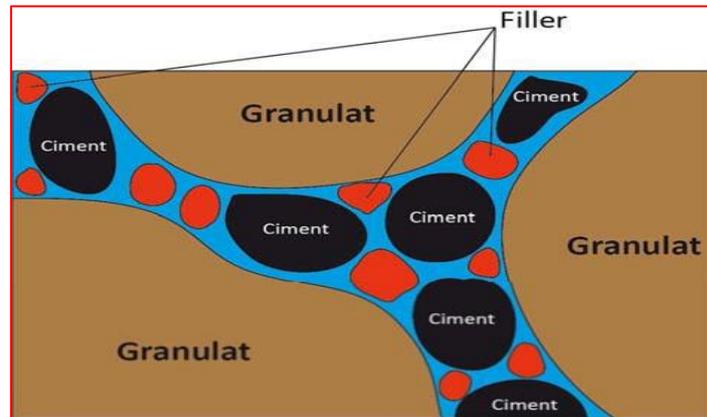


Figure I.8 : Illustration de l'effet filler.

I.6.4 Différents types de calcaire :

Les fillers calcaires sont : [35]

Soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires et contiennent alors des résidus argileux et des matières organiques ;

Soit obtenus par broyage du matériau cru. Les calcaires peuvent avoir des origines géologiques.

❖ Différentes :

- Origine métamorphique, il s'agit des marbres.
- Origine sédimentaire.

Le calcaire se compose principalement de carbonate de calcium CaCO_3 (56,03 % de CaO et 43,97% de CO_2). Le carbonate de calcium existe sous plusieurs formes polymorphiques :

Calcite, aragonite et vèrité [36].

Le calcaire peut contenir aussi SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ou le minéral accessoire qui est la dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ [54,27% CaCO_3 et 45,73% MgCO_3 ou 30,41% MgO et 47,72% CaO]. Le calcaire dolomitique contient un mélange de dolomite et de calcite, tandis que la dolomie ne contient que de la dolomite.

I.6.5 Propriétés et mode d'action des fillers :

Les fillers se différencient les uns des autres par :

- leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent.
- leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- leur dureté, leur porosité.

Les fillers calcaires sont le plus réactifs en présence de ciment, alors que les fillers siliceux sont pratiquement inertes. La réactivité dépendrait de la nature du calcaire, de son état de cristallisation. C'est ainsi qu'une calcite à réseau cristallin désorganisé donne une augmentation de résistance plus rapide qu'une calcite bien cristallisée [37].

I.7 Argiles :

Les argiles sont constituées essentiellement de silice, d'alumine et de fer et constituent par là même le complément indispensable du calcaire. Elles peuvent être classées de plusieurs manières. On distingue ainsi : - Les argiles résiduelles provenant de la décomposition sur place de roches existantes, du fait d'agents physico-chimiques.

- Les argiles transportées et déposées sous l'effet des mers, des cours d'eau, des glaciers, du vent.

Du point de vue physico-chimique on peut classer les argiles en différents groupes :

- Groupe kaolin : formule générale : $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$
- Groupe halloysite : formule générale : $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$
- Groupe montmorillonite : formule générale : $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$.
- Groupe des minéraux argileux micacés : (ex : séricine).
- Groupe des minéraux argileux magnésiens : (ex : sépiolite)

Les argiles utilisées en cimenterie sont des argiles communes qui peuvent être constituées par des mélanges des groupes énumérés. De plus les argiles résiduelles contiennent souvent des fragments des roches qui leur ont donné naissance et qui risquent de les rendre impropres à la fabrication du ciment (silex, quartz, sous forme de nodules, de sable,....etc.). Là encore les impuretés telles que magnésie, soufre, soude, potasse, doivent être en quantité très limitée. D'une manière générale, le coût de la préparation des matières premières croît avec le nombre de constituants à mélanger. Il faut donc s'efforcer d'avoir un nombre de constituants aussi réduit que possible. Ces constituants doivent être faciles à broyer, peu coûteux à sécher s'il s'agit de voies humides et faciles à combiner lors de la clinkerisation [38].

I.7.1 Les grandes familles de minéraux argileux :

Les minéraux de l'argile se répartissent principalement en quatre grandes familles [39], qui sont:

- famille du kaolin $Al_4 [(OH)_8 Si_4 O_{10}]$.
- famille des micas: di octaédrique $K_2 Al_4 [Si_6 Al_2] O_{20} (OH)_4$ tri octaédrique $K 2 Mg_6 [Si_6 Al_2] O_{20} (OH)_4$.
- famille de la montmorillonite $Al_2 [(OH)_2 Si_4 O_{10}] .xH_2O$.
- famille des chlorites : entre deux feuillets de type talc se place un feuillet de type brucite $Mg(OH)_2$, d'où des formules du type $(Mg, Al)_3 [(OH)_2 Al Si_3 O_{10}] Mg_3 (OH)_6$.

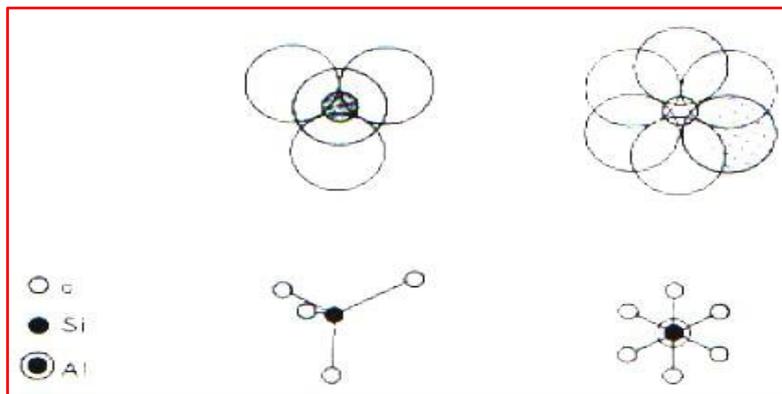


Figure I.9 : Constitution d'un tétraèdre et d'un octaèdre. [40]

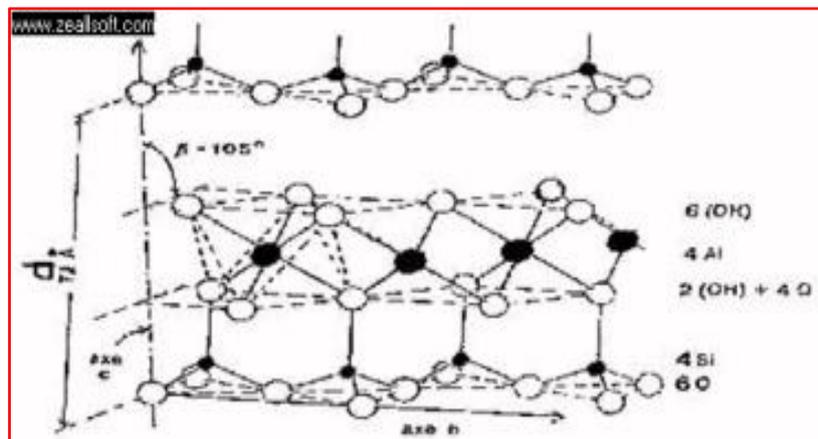


Figure I.10 : Notion de feuillet, inter feuillet (structure) et de distance réticulaire d pour un minéral de type 1:1 (groupe de kaolinite $Si_2 Al_2 O_5 (OH)_4$) [40].

I.7.2 Classification des argiles :

Les argiles sont des roches constituées de variétés de minéraux très fins auxquels viennent s'ajouter des minéraux non argileux tels que le quartz, minéraux lourds, matières organiques Du point de vue chimique, ces minéraux sont des silicates d'alumine qui se présentent sous forme de feuillets. L'empilement de ces feuillets constitue le grain dont la dimension est généralement inférieure à $2\ \mu\text{m}$ [41].

Les argiles sont classées en différents groupes de minéraux selon l'épaisseur de leurs feuillets

- **Minéraux à 7 Å** : Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Son épaisseur est d'environ 7 Å ;
- **Minéraux à 10 Å** : Le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Son épaisseur est d'environ 10 Å ;
- **Minéraux à 14 Å** : Le feuillet est constitué de couches octaédriques interfoliaires [42].

I.7.3 Différents types d'argile :

L'argile est classée selon le nombre, le placement et le vide entre ces feuillets.

- **Minéraux argileux type 1 :1 «TO»** : constitués d'un feuillet tétraédrique surplombant une couche octaédrique. Ils présentent typiquement une taille de 7 Å (TO + interfeuillet). La nature du feuillet octaédrique permet de distinguer les argiles TO à feuillet dioctaédrique (feuillet type brucite, $\text{Mg}(\text{OH})_2$) et les argiles TO à feuillet trioctaédrique (feuillet de type gibbsite) [43].

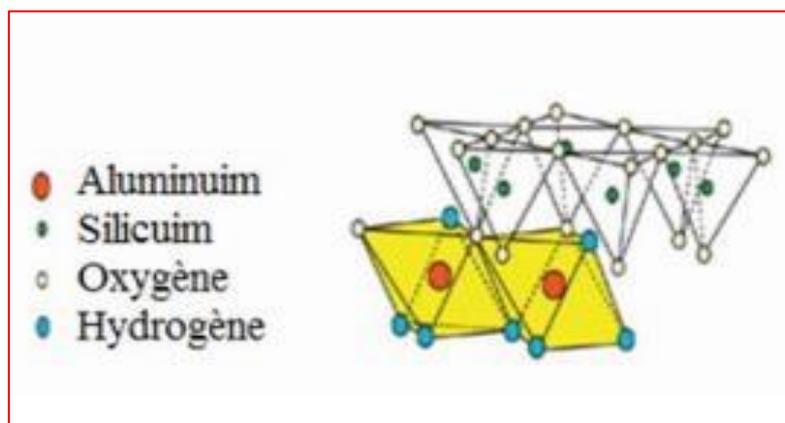


Figure I.11 : Minéraux argileux de type 1:1. [43]

- **Minéraux de type 2:1 (ou T-O-T)** : ils correspondent à une couche d'octaèdres encadrée par deux couches tétraédriques. L'équidistance caractéristique varie de [9,4 à 15 Å], selon la dimension de l'espace inter foliaire (espace entre deux feuillets consécutifs). A ce type correspondent les groupes du talc, des smectites, des vermiculites et des micas.

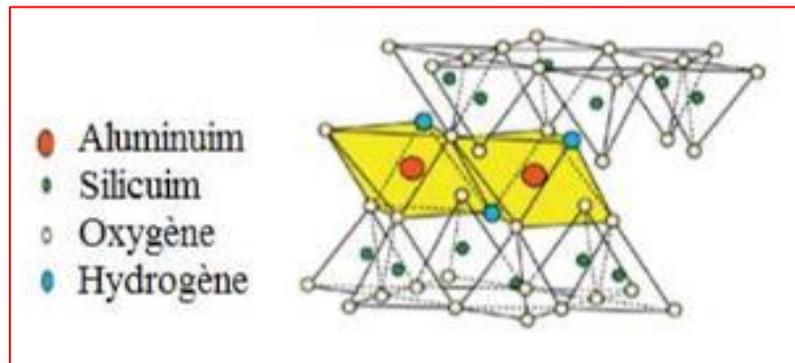


Figure I.12 : Minéraux argileux de type 2:1. [43]

- **Minéraux argileux dits 2:1:1 ou TOTO** : ils ont une couche octaédrique encadrée par deux couches tétraédriques, l'espace interfoliaire étant occupé par une couche d'octaèdres. Ce groupe de minéraux argileux exhibe une équidistance d'environ 14 Å.

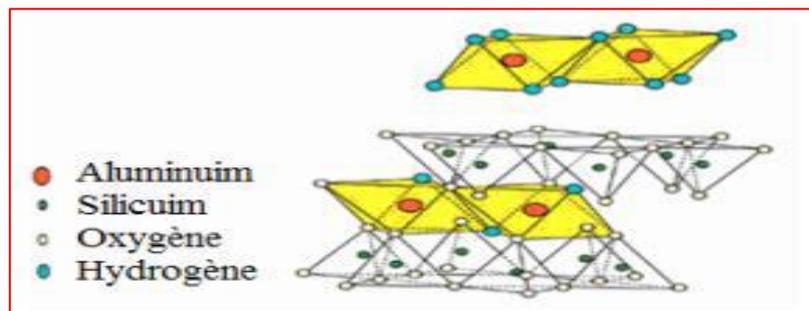


Figure I.13 : Minéraux argileux de type 2:1:1. [43]

- **Minéraux interstratifiés** : Selon leur classement, on considère un minéral interstratifié contenant deux feuillets A et B, on peut en envisager trois types :
 - d1- Ségrévés : une particule donnée présente des séquences AAABBB.
 - d2- Réguliers : une particule donnée comporte des séquences ABABAB...AB.
 - d3- Aléatoires : les cas intermédiaires entre les deux décrits précédemment.

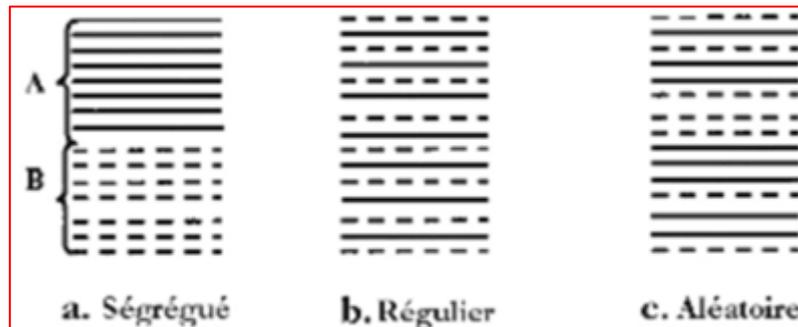


Figure I.14 : Minéraux argileux interstratifiés régulier et irrégulier. [43]

I.7.4 Espèces de minéraux argileux :

Les minéraux argileux sont des silicates d'alumine hydratés et cristallisés, subdivisés en trois variétés [44,46]. Si ces minéraux sont à couche octaédrique discontinue, on parle de minéraux type fibreux. Ils appartiennent à la famille de la sépiolite ou de la palygorskyte. Leurs structures ont des caractères communs avec celles des phyllosilicates, car leur faciès fibreux résulte d'une discontinuité du feuillet dans le sens de la largeur. Les couches T sont continuées et constituées de tétraèdres qui n'ont pas tous la même disposition. Les couches octaédriques sont discontinues. Si ces minéraux sont à couche octaédrique continue et constitués par l'empilement du même feuillet (exemples : O-T/ O-T/ O-T... ou T-O-T/ T-O-T/ T-O-T...), on parle des minéraux types 1/1, 2/1, 2/1/1. Si ces minéraux sont à couche octaédrique continue et constitués par l'empilement des feuillets différents, cet empilement peut être régulier (T-O-T/ O-T/ T-O-T/ O-T...) : cas des interstratifiés ou polyphyllites réguliers, ou irrégulier (O-T/ T-O-T/ T-O-T/ O-T...) : cas des interstratifiés ou polyphyllites irréguliers [46]. La plupart des groupes des minéraux argileux se divisent en deux groupes principaux ; les minéraux di-octaédriques et tri-octaédriques. La distinction entre les deux groupes se fait à partir de la composition des octaèdres ; si les six équivalences négatives de cet octaédrique sont compensées par trois cations divalents (Fe^{2+} , Mg^{2+} ...) (les trois cavités sont remplies par des cations divalents) on parle des minéraux tri-octaédriques [46]. Si la compensation est assurée par deux cations trivalents (Fe^{3+} , Al^{3+} ...) (deux cavités sur trois sont remplies par des cations trivalents), il s'agit des minéraux d'octaédriques [45,46].

I.7.5 Les minéraux à pseudo-feuillets et à faciès fibreux :

Les minéraux fibreux sont des espèces à pseudo-feuillets. Leur faciès fibreux résulte d'une discontinuité du feuillet selon l'axe b. Ce pseudo-feuillet est constitué de plans continus d'oxygène. Dans ces plans, les oxygènes sont aux sommets d'un hexagone plus ou moins régulier. Entre deux plans continus d'oxygène, on trouve deux plans discontinus formés

d'oxygène et d'hydroxyle. L'empilement des deux plans discontinus forme des octaèdres enchevêtrés créant ainsi un ruban. Cette rupture donne naissance à des lacunes qui forment des canaux structuraux entre des rubans. La largeur de ces rubans est caractéristique de chaque famille. Les oxygènes du plan continu forment la base de tétraèdre dont la pointe est constituée par un oxygène du ruban. Ces tétraèdres sont occupés en leur centre par des ions Si^{4+} . Les ions Mg^{2+} ou Al^{3+} occupent les lacunes octaédriques. Les rubans se terminent par des liaisons entre ces cations et des molécules d'eau. On distingue deux principales familles On distingue deux principales familles [47].

I.7.6 Relation entre la taille des particules fines et leurs natures minéralogiques :

(D'après Mitchell 1976) Il existe une infinité de types d'argiles selon les proportions des minéraux [48,49], donc on peut connaître approximativement la nature du minéral d'après la dimension des particules comme indiqué au (Tableau I.2).

Tableau I.2 : Relation entre la taille et la nature de minéraux. [49]

Dimension	Minéraux dominants	Minéraux courants	Minéraux rares
0.1 µm	Montmorillonite	mica	Illite
0.1 à 0.2µm	Mica	Kaolin Montmorillonite	Illite Quartz
0.2à 2 µm	Kaolinite	Illite Mica halloysite	Quartz Montmorillonite Illite
2 à 11 µm	Mica Illite feldspaths	Quartz Kaolinite	Halloysite Montmorillonite

I.7.7 Activation thermique :

L'activation thermique est une exposition de l'argile à la chaleur pouvant atteindre quelques centaines de degrés pour un certain temps. Le traitement thermique provoque quelques modifications dans la structure de l'argile. Le départ de l'eau d'hydratation (eau interfoliaire) est presque total à 220°C environ tandis que le départ de l'eau constitution et des hydroxyles des octaèdres a lieu à des températures plus élevées, dans le domaine 220 à 350°C, cette déshydratation libère des sites et accroît la surface spécifique de l'argile, alors que la capacité d'adsorption du matériau traité est améliorée [50].

I.7.8 Activation chimique :

L'activation à l'acide sulfurique est la plus répandue. L'activation chimique aux acides augmente le nombre de sites acides dans l'argile, qui sont responsables des propriétés d'adsorption et de catalyse. Le maintien du matériau sous activation au-delà de certaines limites fait régresser ce nombre de sites. Selon la littérature l'activation acide est souvent accompagnée par le départ d'abord des éléments Na^+ , Ca^{++} , ensuite suivront les composés MgO , Al_2O_3 et Fe_2O_3 . Les composés du Mg partent plus facilement que ceux de Fe et Al [50]. En fait, l'activation chimique de la montmorillonite est largement étudiée [51]. Au cours du traitement :

- Les cations qui se trouvent dans l'espace interfoliaire sont remplacés par les ions H^+ .
- La dissolution de l'aluminium de la couche octaédrique et du silicium de la couche tétraédrique avec la dissolution des cations structuraux.
- Augmentation de la surface spécifique.

I.8 Argiles Calcinées :

La calcination des argiles consiste à les mettre sous l'effet des hautes températures (400 - 900°C) pendant quelques heures (2 à 5 h). L'argile, vue sa variété minéralogique, peut connaître plusieurs phénomènes à l'occasion de sa calcination : l'évaporation de l'eau libre [52], la transformation du Quartz α en Quartz β [53], la déshydroxylation des phyllosilicates, la décomposition des matières organiques, la décarbonatation des carbonates...etc. C'est principalement le phénomène de déshydroxylation qu'on vise à travers toute calcination. Il s'agit d'arracher l'eau chimiquement liée que comportent les minéraux phylliteux d'une argile. Ces molécules d'eau proviennent des groupements d'hydroxyle (O-H) que contiennent les tétraèdres de silice et les octaèdres d'alumine, composants élémentaires des minéraux phylliteux. C'est après leur déshydroxylation que les oxydes, SiO_2 et Al_2O_3 , deviennent réactifs et peuvent réagir avec la chaux dans une réaction qu'on nomme réaction pouzzolanique.

I.8.1 Mode d'obtention :

Les pouzzolanes sont classées en deux groupes : naturelles et artificielles. Les pouzzolanes naturelles proviennent surtout des roches volcaniques dans lesquelles le constituant amorphe est le verre produit lors du refroidissement suivant la fusion. Les pouzzolanes artificielles les plus couramment utilisées sont les cendres volantes de centrales thermiques. Les fumées de silice, la bauxite calcinée. Les cendres de balles de riz et des argiles calcinées [56, 57,58] dont

on décrit le processus d'obtention par calcination. Transformation thermique: un des moyens les plus utilisés pour obtenir de la pouzzolane artificielle est la calcination, dont l'analyse thermique différentielle (ATD) et le moyen adéquat pour suivre l'évolution des transformations au cours de la calcination et qui met en évidence trois phénomènes.

- ❖ **La déshydratation:** pic endothermique de faible amplitude vers 100°C, elle ne modifie en rien la structure cristallographique, mais elle permet seulement le départ de l'eau physiosorbée.
- ❖ **La déshydroxylation (phase de désorganisation) :** pic endothermique de grande amplitude vers 500°C à 700°C .A ce niveau les hydroxyles sont éliminées de la structure .Il se forme pour le kaolin une phase appelée méta kaolin, pour une argile hétérogène, il se forme une phase différente suivant les minéraux qui la compose. [59,60] .Donc la température de décomposition dépend de la nature des minéraux, de la pression de vapeur maintenu pendant la cuisson [61,62].

C'est dans cette phase que l'argile devient amorphe et par conséquent pouzzolanique. La réaction globale de déshydratation pour la kaolinite peut se schématiser comme suit.



- ❖ **La recristallisation :** pic exothermique vers 900°C à 1200°C. le matériau passe d'une phase amorphe à une phase de recristallisation suivi d'un changement de la nature initiale des minéraux .l'argile dans cette phase devient inerte .le métakaolin subit dans cette phase un réarrangement structurel, elle se transforme en mullite de forme $3\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2$ [54, 55,52].

I.8.2 Composition minéralogique :

L'analyse minéralogique a pour but l'identification et le dosage des minéraux. Elle apporte des renseignements sur le mode de combinaison des éléments .Si toutes fois la reconnaissance de la composition chimique est aisée .Il n'est pas facile d'identifier les espèces minérales en raison de la complexité de leurs mélanges, on peut trouver plus d'un minéral qui présente une intensité de pic (raie) principale identique à un autre. Voinovith [63]. En effet un minéral peut être caractérisé par :

- Sa structure cristalline : qui est un arrangement des atomes dans un réseau géométrique régulier (le kaolin en feuillet à double couche $e=7\text{Å}$).
- Sa morphologie : qui est la taille et la forme des particules ainsi que les défauts (dislocation, Joints de grains, etc.) qui peuvent être déterminé par le microscope électronique.
- Sa micro- composition élémentaire approchée qui peut être déterminé par le Microscope électronique à balayage équipé d'un spectromètre X d'après Terrier [63].

I.8.3 Domaine d'utilisation :

Les propriétés des argiles ont été reconnues et utilisées depuis la plus haute antiquité. Nos ancêtres de la préhistoire fabriquaient des poteries rudimentaires et des outils en silex [64].

I.8.3.1 Matériaux de construction :

L'argile calcinée est la matière première principale avec quelques additions de sable, de chamotte comme fondant dans la fabrication des briques, tuiles et céramiques [55]. Les argiles peu fusibles sont réfractaires entre 1350 à 1580°C servent pour la fabrication des briques, des carreaux de sol et les tuyaux d'évacuations [65]. Les argiles fusibles sont réfractaires au-dessous de 1350°C servent pour la fabrication des briques, et tuiles [65].

I.8.3.2 Utilisation générale :

La composition d'une solution saline est modifiée au contact d'argile; des cations "disparaissent" et sont remplacés par d'autres empruntés à l'origine elle-même; c'est le phénomène d'échange de cations. Les argiles, servent aussi à diluer les pesticides utilisés en agriculture lors de leur épandage. Le pesticide, doit atteindre sa cible sans être décomposé par l'argile pendant les étapes suivantes; production, transport, stockage et application. Les argiles du groupe des smectites (montmorillonite) ou encore la sépiolite et la palygorskite sont utilisées dans l'industrie pour leur propriété d'absorption et d'adsorption:

- Absorption des huiles et graisses (sols des garages; d'usines, ...), dégraissage.
- Décoloration des huiles et usage comme liant pour les aliments du bétail.
- Usages pharmaceutiques (excipients, pansements gastro-intestinaux,...).
- Boues de forage en milieu salin, engrais en suspensions.
- Les interstratifiés smectite -kaolinite servent en fonderie comme liant des sables de moulage.

- De nombreux travaux ont montré que les argiles possèdent aussi des propriétés catalytiques.

On retiendra:

- Les catalyseurs argileux dans le cracking des produits pétroliers.
- Les propriétés catalytiques de la montmorillonite dans la formation des aminoacides et dans leur polymérisation en peptides.
- Les essais de polymérisation du benzène en polyparaphénylène dans une Montmorillonite.
- Les tentatives de polymérisation du styrène du méthacrylate de méthyle et d'autres Composés organiques non saturés sur les surfaces de certains minéraux argileux. De L'étude comparative des activités catalytiques de divers minéraux argileux Sur La polymérisation du styrène, il ressort que la kaolinite, la palygorskite et certains mélanges kaolinite - palygorskite- illite- montmorillonite donnent des résultats satisfaisants.
- Les argiles kaolinitiques non modifiées ont un caractère semi -renforceur des gommés naturelles ce pouvoir est d'autant plus grand que les argiles utilisées sont pures et bien cristallisées. La teneur en kaolinite est favorable au semi renforcement tandis que les teneurs en quartz et en mica lui sont défavorables.
- L'industrie papetière a connue depuis une cinquantaine d'années, un développement Considérable qui la place au premier rang des consommateurs de kaolins,. En papeterie l'utilisation se répartit entre les kaolins de masse, servant à améliorer les propriétés optiques de la trame cellulosique et les kaolins de couchage qui assurent la qualité et l'aspect esthétique de l'impression. Plus récemment sont apparus les cartons couchés dans la fabrication d'emballages supports publicitaires.
- Les industries céramiques du bâtiment sont utilisatrices d'argiles kaolinitiques, les carreaux de grés céramique par exemple sont soumis à des conditions d'utilisation particulières, on recherche alors une résistance mécanique élevée et une bonne régularité des produits [64].

I.8.4 Rôle de l'argile calcinée :

La structure amorphe de l'argile calcinée entre 600 et 850°C, lui acquiert des propriétés pouzzolaniques. Un remplacement d'un pourcentage du ciment portland dans les mortiers et les bétons peut être envisagé, car la rend capable de réagir avec la portlandite libérée par

l'hydratation du ciment portland pour produire des hydrates de nature proche de ceux du ciment qui contribuent à l'augmentation de la résistance mécanique. La calcination d'une argile constituée d'un réseau cristallin très désorganisé, conduit à de bonnes performances pouzzolanique [61, 62,66]. L'activité pouzzolanique augmente avec l'amorphisation du réseau minéralogique de l'argile calcinée.

I.8.5 Réactivité pouzzolaniques des argiles calcinées :

Les argiles calcinées (déchet de briques) se distinguent par une vitesse de réaction plus rapide et par une réactivité plus élevée avec l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment portland [61,66]. Les composés ainsi formés, par exemple, les C-S-H et les hydrates aluminosilicates [67,63] ont pour effet de diminuer la porosité des mortiers et des bétons, ce qui favorise la durabilité des ouvrages. La consommation de l'hydroxyde de calcium par le déchet de briques permet également de supprimer le phénomène des efflorescences. Dans un premier temps on a choisi de rappeler la définition et les méthodes de mesure de l'activité pouzzolanique Parmi.

Celle-ci :

- Déterminations chimiques (L'indice d'activité Chapelle).
- Méthodes physiques (taux de vitrification des minéraux).
- Essais mécaniques et analyses chimiques.

I.9 Mortiers :

I.9.1 Définition :

Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction. En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, d'un liant (ciment ou chaux) et d'eau dans des proportions données, différent selon les réalisations [68].

I.9.2 Les différents types de mortiers :

I.9.2.1 Les mortiers de ciment :

Les mortiers de ciments sont très résistants, prennent et durcissent rapidement. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1/3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 1/2. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables. En revanche, il est davantage sujet au retrait [68].

I.9.2.2 Les mortiers de chaux :

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment. Les mortiers de chaux sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment [68].

I.9.2.3 Les mortiers bâtards :

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux. Généralement, On utilise la chaux et le ciment par parties égales, mais on mettra une quantité plus ou moins grande de l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée. Les chaux apportent leur plasticité, les ciments apportent la résistance mécanique et un durcissement plus rapide.[68].

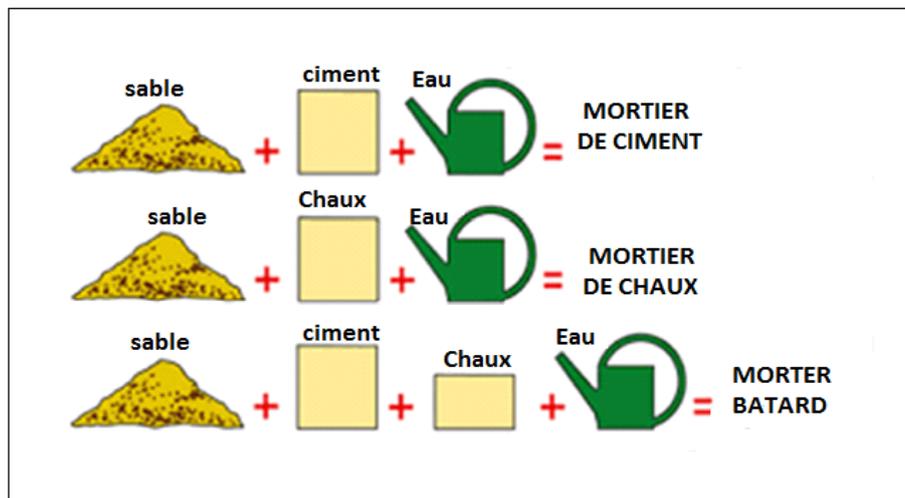


Figure I.15 : Les différents types de mortiers [69].

I.10 Conclusion :

Les mortiers et les ciments sont les matériaux les plus utilisés et les plus importants dans le domaine de la construction surtout ces dernières années en Algérie.

Aussi que le procédé de fabrication du ciment portland nécessite une énergie importante et dégage du CO₂ et de la poussière causant la pollution de l'environnement, Par conséquent, dans ce chapitre, nous avons mis en évidence le mortier, le ciment et les additifs minéraux qui peuvent être utilisés dans le ciment, en particulier l'argile comme remède à ces problèmes et une alternative efficace.

REFERENCES:

- [1] HOUARI Hacéne «Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité) », THESE, Doctorat en science en Génie Civil Option : Matériaux : Soutenue le 2009 ;1-3 - 21-25p.
- [2] M. Venuat, « La pratique des ciments, mortiers et bétons » Tome 1 : Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers -édition2 – Collection Moniteur. -1989– 277p.
- [3] Thomas Point. « Influence des hydroxypropylguars sur les propriétés du mortier de ciment à l'état frais » 27 juin 2014. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00936958/document>
- [4] www.chapitre1.revue.de.la.documentation.com
- [5] Brocard J. Encyclopédie pratique de la construction et du bâtiment, Tome I. Paris ; Librairie Aristide Quillet 1968. p 813-815.
- [6] CHIKOUCHE MOHAMED AZIZ: « Effet des ajouts à base d'argile gréseuse et vaseuse sur les propriétés des matériaux cimentaire
- [7] <https://www.infociments.fr/ciments/types-et-composition>
- [8] El-Batouti, M., O. Ivi. Sadek et F. F. Assaad. 2003. «Kinetics and Thermodynamics Studies of Copper Exchange on Na-montmorillonite Clay Mineral». Journal of Colloid and Interface Science, vol. 259, p. 223-227
- [9] Abassi, T.(2013).«Influence des additions locales pour l'amélioration des propriétés mécaniques des bétons à jeunes âges» .Mémoire
- [10] L. PLISKIN : « La fabrication du ciment » - Edition Eyrolles – 217p- Paris 1993.
- [11] R. CHAID. Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux. Thèse de doctorat d'état en génie civil ENP décembre 2006.
- [12] M. Regourd, H. Hornain, « Applications de la microscopie électronique à balayage » Revue des matériaux de construction, 693 : 73–87- 1975.
- [13] R. Gané « Cours de durabilité et Réparation des bétons » - Chapitre 2- Université de Sherbrooke – p32 - Canada 2002.
- [14] E. Guillon, « Durabilité des matériaux cimentaires –Modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles », thèse de doctorat, ENS Cachan/ CNRS/ Université Paris 6, France-2004.
- [15] Y. Older , « Hydratation, setting and hardening of Portland cement », dans Lea's - Chemistry of Cement and Concrete, chap.6, Arnold, 4th éd- 1998.
- [16] Kiran Pokkuluri « Effect of admixtures, chlorides, and moisture on dielectric properties of Portland cement concrete in the low microwave frequency range» - Master thesis – Virginia University – 210p - October 1998.
- [17] BELHOCINE, A. and N. NAGOUDI, Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux.
- [18] Pierre MEUKAM. «Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments », Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2004.
- [19] Venuat, M., La pratique des ciments, mortiers et bétons. 1989: Editions du Moniteur.

- [20] Ollivier JP, Carles-Gibergues A, Hanna B. « Activité pouzzolanique et action de remplissage d'une fumée de silice dans la matrice de béton de haute résistance». Cem Concr Res 1988.
- [21] CHIKOUCHE MOHAMED AZIZ: « Effet des ajouts à base à base d'argile gréseuse et vaseuse sur les propriétés des matériaux cimentaire ».
- [22] Khadidja, Z., Etude du mode de fabrication du ciment et effet des matières premières- Impact de l'utilisation du ciment sur l'environnement. 2011, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef.
- [23] BOUGDAH N. 2007. Etude de l'adsorption de micropolluants organiques sur la bentonite. Mém. Mag. Univ. Skikda.
- [24] Pharmacopée européenne. 6th ed, 2008.
- [25] BOURAS O. (2003) propriétés adsorbants d'argiles pontées organophiles synthèse et caractérisation .Mém.Doctorat.Univ. LIMOGES.
- [26] McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms. Retrieved June 12, 2008.
- [27] MEBARKI K, TABAHRII M. N. 2011, Géochimie de la bentonite du gisement de la région de Maghnia et applications industrielles. Mém. Mast. Univ. Tlemcen.
- [28] LOPEZ-GALINDO A., VISERAS C. Pharmaceutical and cosmetic application of clays, In. Clay Surfaces, Fundamentals and Applications, Elsevier ; Amsterdam, 2004, 267.
- [29] LOPEZ-GALINDO A, VISERAS C, CEREZO P. Compositional, technical and safety specifications of clays to be used as pharmaceutical and cosmetic products. Applied Clay Science. 2007, 36, 51.
- [30] BOMBLED J-P, « Rhéologie des mortiers et des bétons frais, influence du facteur ciment », Proceeding of RILEM, Leeds Seminar, Vol.1, sujet 3, P.1-169, 1973.
- [31] De Larrard F., 2000, Structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par Lecomte A., LCPC, OA34.
- [32] Melle GUEMMADI Z., TOUMI B., Dr HOUARI H., Pr CLASTRE P. AMELIORATION DES PERFORMANCES DES BETONS PAR LES AJOUTS DE FINES CALCAIRES.Séminaire International de Géomatériaux GEOMAT'02.Université Mohamed Boudiaf de M'sila - Algérie, les 10-11 Mars 2003.
- [33] CARE S., LINDER R., BAROGHEL BOUNY V., DE LARRARD F., ET CHARONNAT Y., Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage du béton - Plan d'expérience et analyse statique, LCPC, Ouvrages d'art OA 33. Février 2002.
- [34] CYR M., LAWRENCE P., RINGOT E., Efficiency of mineral admixtures in mortars, Quantification of physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength, Cement and concrete research Vol. 36(2), pp. 264-277, 2006.
- [35] Dreux .G & J. Festa: «Nouveau guide du béton et de ses constituants». 8ème Edition. Eyrolles. Mai (1998).
- [36] S .Husson, « Étude physico-chimique et mécanique des interactions ciment-fibres : Applications aux mortiers », Thèse Doct. Ing , p.166 INSA-Lyon,(mars 1991).
- [37] A.Komar, « Matériaux et éléments de construction», Edition mir, pp 1-56, Moscou (1976).
- [38] Documentation de la cimenterie de Hamma Bouziane; Le ciment portland.
- [39] Guy, A., P. Roland et G. Claude. 1978. Précis de minéralogie. Paris, Masson, 335 p.
- [40] SIMONE CAILLERE .Minéralogie des argiles P355.

- [41] Bouras Omar, 2003. Propriétés adsorbantes d'argiles pontées organophiles: synthèse et caractérisation. Thèse de doctorat de l'université de Limoges
- [42] S. Caillère, S. Hénin et M. Rautureau, 1982. Minéralogie des argiles : Classification et Nomenclature; Editions Masson; Paris.
- [43] P. Liao, Z. Zhan, J. Dai, X. Wu, W. Zhang, K. Wang, S. Yuan, Adsorption of tetracycline and chloramphenicol in aqueous solutions by bamboo charcoal: A batch and fixed-bed column study, Chem. Eng. J. 228 (2013) 496–505.
- [44] Brindley, G.W. and Brown, G. (1980) X-Ray Diffraction Procedures for Clay Mineral Identification. In: Brindley, G.W. and Brown, G., Eds., Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-Ray Identification, Mineralogical Society, 305-356.
- [45] Aliprandi, G. (1979) Matériaux réfractaires et céramiques techniques, Edition septima, Paris.
- [46] BENKHEDAA A. (2016) : Initiation à une étude géotechnique et analyse minéralogique des argiles oxfordiennes de la région Tiaret. Mémoire de fin d'études master, Université Kasdi Merbah – Ouargla
- [47] EL HACHMI, Abdelhadi. 2013. « Argile et minéraux argileux: propriétés physico-chimiques et propriétés et propriétés colloïdales ».
- [48] BICH.CHRISTEL, contribution à l'étude l'activation thermique du kaolin : évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique. thèse, MEGA de Lyon, 2005, p559.
- [49] BARRON J. SAUTEREY R. Le béton hydraulique .Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées paris.p559.
- [50] Z. Mahi. Récupération de métaux lourds par l'argile de Maghnia modifiée : cas du cuivre et du plomb. Mémoire de magister. Université d'Oran, Oran, 2006.
- [51] F. Gomri. Synthèses et caractérisations d'argiles cationiques et anioniques organophiles. Elimination des chlorophénols. Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas, Sétif, 2010.
- [52] Chakchouk A., Samet B., Mnif T., «Study on the potential use of Tunisian clays as pozzolanic material», Applied Clay Science, vol 33, 2006, p. 79–88.
- [53] Pagliari L., Dapiaggi M., Pavese A., Francescon F., «A kinetic study of the quartz–cristobalite phase transition», Journal of the European Ceramic Society, vol 33, 2013, p. 3403–3410.
- [54] SIMONE CAILLERE .Minéralogie des argiles P355.
- [55] JEAN-PIERRE MAGNAN. Mécanique des sols et des roches.2000. vol 1.
- [56] MESSI. A. Propriétés des ciments pouzzolaniques élaborées à partir de latérites actives.
- [57] SADR-MONTAZI A. Conception de nouveaux ciments composés. Thèse .Lyon: INSA de Lyon1988, p256.
- [58] AMBROISE J. Elaboration de liants pouzzolaniques à moyenne température et études de leurs propriétés physico-chimique et mécaniques. Thèse. Lyon : INSA de Lyon, 1984,165p.
- [59] BRINDLEY G.W, NAKAHIRA M. The kaolinite - mullite reaction series: I Survey of outstanding problems .II The high temperature phase .Journal of American ceramic society, 1959, vol.42, p311-324.

- [60] HORVATH I, KRANZ G.A .Thermoanalytical study of high temperature dehydration of kaolinites with various structural arrangements.Silikaty, 1980,vol 24,p149-156.
- [61] GNIEWEK J. Réactivité des montmorillonites calcinées .Utilisation dans le génie civil. Thèse .Lyon: INSA de Lyon, 1987,184p.
- [62] BICH.CHRISTEL, Contribution à l'étude l'activation thermique du kaolin: évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique . Thèse, MEGA de Lyon, 2005, p264.
- [63] BARRON J. SAUTEREY R. Le béton hydraulique .Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées Paris.p559.
- [64] Mr. Benyahia Abdeslam Mémoire Master 2016/2017 .
- [65] A KOMAR. Matériaux et éléments de construction, Editions Mir Moscou 1976, p540.
- [66] KAKALI G, PERRAKIT, TSIVILLIS, et al. Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity. Applied Clay Science, 2001, vol 20, p73-80.
- [67] AMBROISE J. Elaboration de liants pouzzolaniques à moyenne température et études de leurs propriétés physico-chimique et mécaniques. Thèse . Lyon :INSA de Lyon, 1984,165p.
- [68] **Bouali. Khaled**, « Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires », mémoire de magister ,«Option Physique et Mécanique des Matériaux», universite m'hamed bougara-boumerdes (2013/2014).
- [69] **Maisonbrico.com Maçonnerie**, «matériaux, produits, mélanges et proportions.

CHAPITRE II MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre présent, nous présentons tout d'abord les différents matériaux utilisés, ainsi que le protocole utilisé pour la préparation de la bentonite,

En deuxième partie nous décrivons les protocoles expérimentaux utilisés pour la préparation des mortiers (confectionnés les échantillons) suivi par les différents essais réalisés au cours de notre étude.

* **Les matériaux utilisés sont :**

- Eau :** Eau distillée
Ciment : CEM I (MOKAOUEM)
Sable : Sable d'Oued M'zi de Laghouat
Bentonite : de la région de Tlemcen
Filler calcaire

Tableau II.1: Un tableau représentant les pourcentages de matériaux utilisés.

Notation		En Pourcentage (%)			En Gramme (g)				
		Ciment	L	B	C	L	B	Sable	Eau
A1	formulation 1	90%	5%	5%	405	22,5	22,5	1350	315
A2	formulation 2	85%	5%	10%	382,5	22,5	45	1350	315
A3	formulation 3	80%	5%	15%	360	22,5	67,5	1350	315
B1	formulation 4	85%	10%	5%	382,5	45	22,5	1350	315
B2	formulation 5	80%	10%	10%	360	45	45	1350	315
B3	formulation 6	75%	10%	15%	337,5	45	67,5	1350	315
C1	formulation 7	80%	15%	5%	360	67,5	22,5	1350	315
C2	formulation 8	75%	15%	10%	337,5	67,5	45	1350	315
C3	formulation 9	70%	15%	15%	315	67,5	67,5	1350	315

$$E/C = 0.7 \quad | \quad E = 315g \quad , \quad C = 450g.$$

Tableau II.2: Un tableau représentant l'essai qui a été effectués.

Programme Expérimentales	7j	14j	30j
Résistance à la traction par flexion	oui	oui	Oui
Résistance à la compression	oui	oui	oui
la variation de la Masse	oui	oui	Oui
Absorption capillaire	oui	oui	Oui
Porosité accessible à l'eau	oui	oui	Oui

II.2 Caractérisation des matériaux utilisés :

Les caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisées pour les différentes formulations sont présentées au-dessous :

II.2.1 Ciment :

MOUKAOUM-PLUS est un ciment gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de gypse inférieure à celle d'un ciment portland compos, NA 442 -CEM I 42,5 N-SR3 selon la NA 442 v 2013 et la EN 197-1 Il est conforme à la norme nationale NA 442 v 2013 et à la norme Européenne EN 197-1 avec un taux en C3A < 3%. (cf. fiche technique Annexe A)



Figure II.1 : Sac de Ciment CEM I /A 42.5.

II.2.2 Sable :

Dans le mélange de notre étude, on a utilisé un sable oued M'zi de la région Laghouat.



Figure II.2 : Sable Oued M'zi Laghouat.

II.2.2.1 Analyse Granulométrique : [NF EN 933-1]

- Prélever (2 kg) de matériau (sable sec).
- Préparation de l'échantillon qui sera analysé. Le choix du matériau imposera aussi le choix des tamis. L'échantillon choisi devra être sec. Sa teneur en eau pourra être vérifiée avec l'essai correspondant de mesure de teneur en eau.
- Monter la colonne de tamis dans l'ordre décroissant en mettant le tamis avec la plus grosse maille en haut et le tamis avec la plus petite maille en bas, en finissant avec le fond de tamis et le couvercle de la colonne.
- Verser le matériau sec dans le tamis.
- Fermer le couvercle de la colonne de tamis.
- Secouer manuellement ou mécaniquement la colonne de tamis.
- Reprendre un à un les tamis en ajoutant le fond et le couvercle le tamisât intégrant le tamis suivant et le refus restant dans le tamis initial.
- Déterminer à l'aide de la balance électronique la masse de chaque refus.
- Réaliser cette opération sur tous les refus y compris le matériau dans le fond de la colonne de tamis.
- Remplir le tableau correspondant avec les résultats des masses obtenues et calculer les pourcentages de refus et tamisât pour chaque tamis.
- Tracer sur la feuille de graphique vierge la courbe de granulométrie à l'aide des résultats obtenus.



Figure II.3 : L'analyse Granulométrique.

Les résultats de l'analyse granulométrique sur le sable concasse sont présentes sur la courbe suivante :

Tableau II.3 : Analyse granulométrique du sable Oued M'zi (Laghouat).

les tamis (mm)	Refus partiel	refus cumulé	pourcentage refus (%)	Pourcentage passant (%)
5	0	0	0	100
4	13,8	13,8	0,69	99,31
3,15	13	26,8	1,34	98,66
2,5	15,5	42,3	2,115	97,885
2	19,2	61,5	3,075	96,925
1,6	17,3	78,8	3,94	96,06
1	64,3	143,1	7,155	92,845
0,8	53,7	196,8	9,84	90,16
0,63	70	266,8	13,34	86,66
0,4	379,5	646,3	32,315	67,685
0,2	993,3	1639,6	81,98	18,02
0,125	137,7	1777,3	88,865	11,135
0,08	64,5	1841,8	92,09	7,91

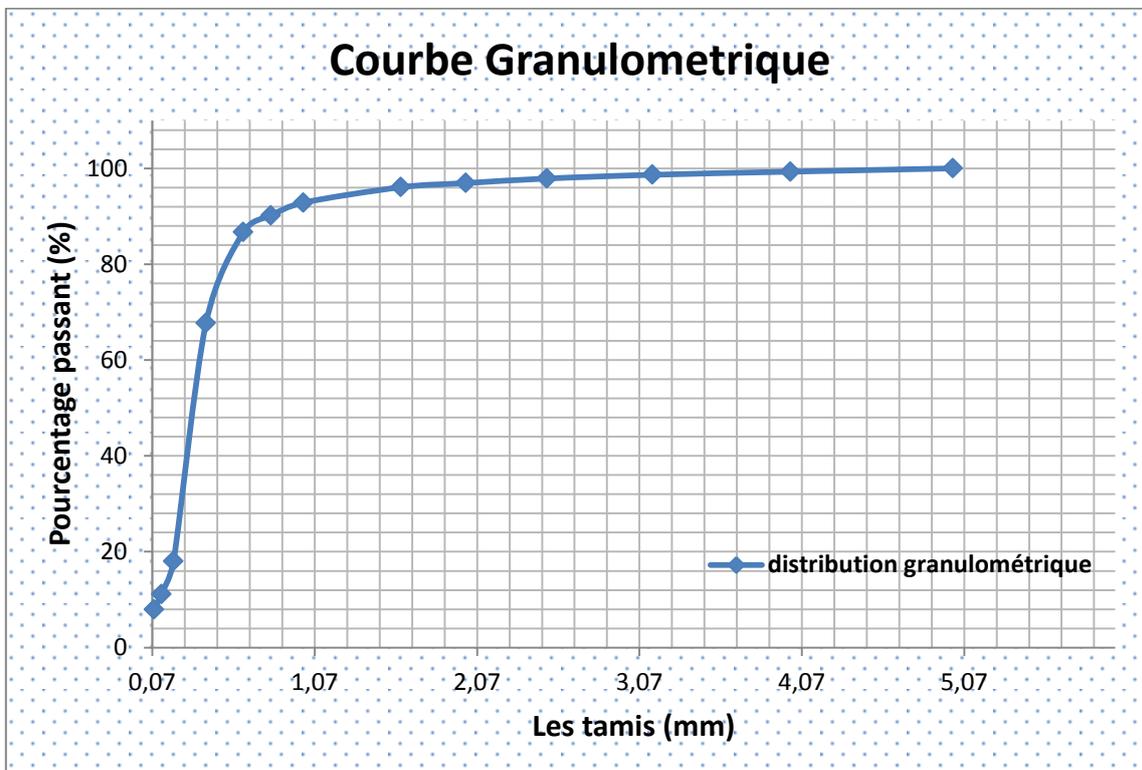


Figure II.4 : Courbe distribution granulométrique.

II.2.2.2 Equivalent de Sable : [NF EN 933-8]

Notre essai permet de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuses ou ultrafines contenues dans le sable et le pourcentage de poussières nuisibles et les éléments argileux qui diminuent la qualité du béton et mortier.

*** Mode opératoire:**

- Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à **500 g**).
- Prendre une pesée de **120 g**.
- Remplir l'éprouvette de solution la vente jusqu'au premier repère (**10cm**).
- A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (**120g**) dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de chasser toutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- Laisser reposer pendant **10** minutes.
- Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et lui imprimer **90** cycles de **20cm** de voie horizontale en **30** secondes à la main à l'aide d'un agitateur mécanique.
- Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution la vanteau dessus de l'éprouvette, rincé ensuite les parois de celle-ci.
- Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage. Cette opération a pour but de laver le sable et de faire monter les éléments fins et argileux. Effectuer cette opération jusqu'à ce que la solution la vante atteigne le **2^{ème}** repère. Laisser ensuite reposer pendant **20** minutes.

❖ Mesure avec une règle de mesure (ESV).

$$ESV = \frac{h_2}{h_1} * 100 \dots\dots\dots(1)$$

Tableau II.4 : Résultats Equivalent de sable.

	h_1	h_2	E.S.V (%)	Moy E.S.V (%)
Essai 1	12,5	7,6	60,8	61,35
Essai 2	12,6	7,8	61,9	

Tableau II.5 : Valeur Préconisée pour L'équivalent de Sable.

E.S.V	Nature Et Qualité Du Sable
Esv < 65	sable argileux; à rejeter pour des bétons de qualité
65 ≤ Esv < 75	sable légèrement argileux; admissible pour des bétons de qualité courante
75 ≤ Esv < 85	sable propre à faible pourcentage de fines argileuses; convenant parfaitement pour des bétons de qualité.
Esv ≥ 85	sable très propre: absence presque totale de fines argileuses

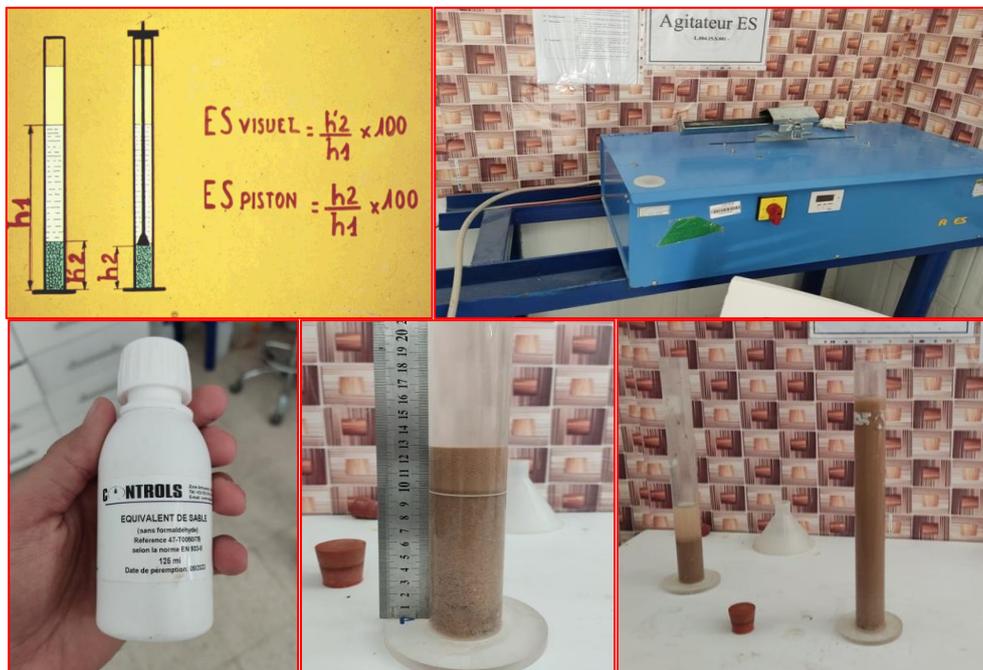


Figure II.5 : Processus de L'essai d'équivalent de Sable.

II.2.2.3 Masse volumique apparente : [NF P 18-555]

C'est la masse du matériau par unité de volume y compris des vides existants entre les grains.

❖ **Mode opératoire :**

- On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité 2 à 2,5 litres.
- On remplit l'entonnoir avec du sable sec.
- On pèse le récipient vide M1.
- On place le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15 cm et on le remplit avec du sable.
- Une fois le récipient est rempli, on nivelle la surface du sable et on pèse le tout. Soit M2 ce poids.
- Volume de récipient $V_r = 2000 \text{ cm}^3$.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\rho = \frac{M}{V_r} \dots\dots\dots (2)$$

Tableau II.6 : Masse Volumique Apparente du Sable Oued M'zi (Laghouat).

N° d'essai	M (g)	V _r (cm ³)	ρ app (g/cm ³)	ρ app moy (g/cm ³)
1	2855	2000	1.428	1.444
2	2883	2000	1.442	
3	2923	2000	1.462	

Pour le sable de Oued M'zi (Laghouat) la masse volumique apparent est : **1.444 g/cm³**



Figure II.6 : Récipient Rempli par le Sable.

II.2.2.4 Teneur en eau : [NF P 18-554]

Le sable à la capacité de retenir une quantité d'eau très grande (elle peut atteindre **20** à **25** % de son poids), si son humidité est comprise entre la limite de **0** à **3**%, on l'appelle sec.

❖ **Mode opératoire:**

- ◆ Peser un échantillon de sable humide, soit M_h son poids (**1675** g).
- ◆ Laisser l'échantillon dans une étuve à une température **55°C** à **24** heures.
- ◆ Peser l'échantillon de nouveau, soit M_s son poids.

La teneur en eau du sable est:

$$W = \left(\frac{M_h - M_s}{M_h} \right) \times 100 [\%] \dots\dots\dots(3)$$

Et :

- M_h : Poids du sable humide en (g).
- M_s : Poids du sable sec en (g).

Tableau II.7 : Teneur en Eau du Sable Oued M'zi (Laghouat).

N° d'essai	M_h (g)	M_s (g)	W (%)
1	1675	1643	1.95

II.2.2.5 Caractérisation chimique de Sable :

Le Sable utilisé dans notre étude ou sa composition chimique a été déterminée à l'aide des analyses chimique effectués dans laboratoire chimie de LTPS L'analyse de bentonite utilisé a révélé l'existence des éléments qui sont présentés dans les tableaux :

Tableau II.8 : Composition chimique de Sable. (Annexe C)

	Echantillon	Sable
Carbonates [NF P 15-461]	Prise d'essai: m_0 (g)	0,5
	Volume HCl (cm ³)	10
	Chute de NaOH	9,5
	Volume d'acide réagissant $X=V_a - V_b$ (cm ³)	0,5
	Teneur en CaCO ₃ $\frac{5 \cdot X}{m_0}$	5
Insolubles NFP 15-461	Prise d'essai : m_0 (g)	1
	Creuset + précipité : m_2	29,827
	Creuset vide m_1	28,901
	%Insolubles : $\frac{(m_2 - m_1) * 100}{m_0}$	92,6
Sulfates BS 1377 :1990	Prise d'essai : m_3 (g)	/
	Creuset + précipité : a (g)	/
	Creuset vide : b (g)	/
	$m_2=a-b$ (g)	/
	$SO_3(\%)=0,343*(m_4/m_3)*100$	/

II.2.3 Bentonite :

L'argile de bentonite a été fournie par ENOF Ltd. de la région de Maghnia, wilaya de Tlemcen, Algérie. L'argile a été reçue sèche et pulvérisée dans des sacs de 50 Kg qui étaient destinés à être utilisés comme fluide de forage. Les propriétés de l'argile ont été dans (cf. fiche technique Annexe B).

II.2.3.1 Préparation de la bentonite :

Nous avons utilisé deux types de bentonite : la première bentonite broyée mécaniquement et la deuxième de bentonite calcinée à 750 °C. La bentonite a été préparée selon les étapes suivantes :

a) Bentonite broyée mécaniquement :

Sécher la bentonite à 110 °C pendant 24 h en suit :



Figure II.7 : Bentonite après le séchage.

-La bentonite a subi un processus de broyage mécanique à l'aide d'un appareil appelé micro-Deval (Figure II.8).



Figure II.8 : Appareil Micro-Deval.

La méthode de préparation suit les étapes suivantes :

On a pesé 500 grammes de bentonite et 5000 grammes de boulets sphériques en acier inoxydable (Figure II.9).



Figure II.9 : la bentonite et les boulets sphériques.

Mettre la bentonite et les boulets sphériques dans un cylindre creux (De un à quatre cylindres creux, chaque cylindre est utilisé pour effectuer l'essai).



Figure II.10 : les boulets à mélanger avec la Bentonite dans les cylindres creux.

Remplacer le couvercle et serrer les boulons de fixation. S'assurer que les cylindres sont étanches pendant leur rotation.

-Mise en place les quatre cylindres dans la machine.

-Mise en route de l'essai en faisant effectuer à la machine 12.000 rotations à une vitesse régulière en deux heures et demie.



Figure II.11 : Time-tronic.

Un dispositif qui permet au moteur de s'arrêter automatiquement à la fin de l'essai. Nous mettons la bentonite dans un tamis et la tamisons pour la séparer des boulets. (Figure II.11)



Figure II.12 : la bentonite après un broyage mécanique.

b) Calcination thermique :

La calcination de la bentonite se fait dans un four à moufle (Figure II.13).



Figure II.13 : Four à moufle.

Dans cette partie, nous avons calcinée la bentonite qui a été broyée mécaniquement dans une température de 750°C avec une vitesse de 5°C par minute (environ deux heures et demie).

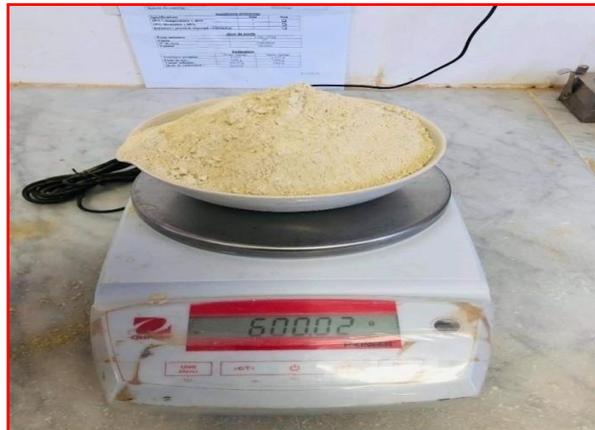


Figure II.14 : Bentonite broyée.

Pour éviter le choc thermique les échantillons a été récupéré après 24h (stabilité de température ambiante).



Figure II.15 : Bentonite Calcinée.

II.2.3.2 Caractérisation chimique de Bentonite :

Le Bentonite utilisé dans notre étude ou sa composition chimique a été déterminée à l'aide des analyses chimique effectués dans laboratoire chimie de LTPS L'analyse de bentonite utilisé a révélé l'existence des éléments qui sont présentés dans les tableaux :

Tableau II.9 : Composition chimique de Bentonite. (Annexe C)

	Echantillon	Bentonite
Carbonates [NF P 15-461]	Prise d'essai: m_0 (g)	0,5
	Volume HCl (cm^3)	10
	Chute de NaOH	9,5
	Volume d'acide réagissant $X=V_a - V_b$ (cm^3)	0,4
	Teneur en CaCO_3 $\frac{5 \cdot X}{m_0}$	4
Insolubles NFP 15-461	Prise d'essai : m_0 (g)	1
	Creuset + précipité : m_2	29,483
	Creuset vide m_1	28,718
	%Insolubles : $\frac{(m_2 - m_1) * 100}{m_0}$	76,5
Sulfates BS 1377 :1990	Prise d'essai : m_3 (g)	1
	Creuset + précipité : a (g)	29,909
	Creuset vide : b (g)	29,902
	$m_2 = a - b$ (g)	0,007
	$\text{SO}_3(\%) = 0,343 * (m_4 / m_3) * 100$	0,24

II.2.4 Filler Calcaire :

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes). Les fillers se différencient les uns des autres par :

- Leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leur défaut de structure, les impuretés qu'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.



Figure II.16 : Limestone (filler calcaire).

II.2.4.1 Préparation de Filler calcaire :

Nous avons utilisé filler calcaire broyée mécaniquement.

La filler calcaire a été préparée selon les étapes suivantes :

❖ Filler calcaire broyée mécaniquement :

Sécher la filler calcaire à 110 °C pendant 24 h en suit :



Figure II.17 : filler calcaire après le séchage.

La filler calcaire a subi un processus de broyage mécanique à l'aide d'un appareil appelé micro-Deval (Figure II.8).

La méthode de préparation suit les étapes suivantes :

On a pesé 500 grammes de filler calcaire et 5000 grammes de boulets sphériques en acier inoxydable.

Mettre la filler calcaire et les boulets sphériques dans un cylindre creux.



Figure II.18 : la filler calcaire et les boulets sphériques.

Remplacer le couvercle et serrer les boulons de fixation. S'assurer que les cylindres sont étanches pendant leur rotation.

- Mise en place le cylindre dans la machine.
- Mise en route de l'essai en faisant effectuer à la machine 12.000 rotations à une vitesse régulière en deux heures et demie.

Un dispositif qui permet au moteur de s'arrêter automatiquement à la fin de l'essai. Nous mettons la filler calcaire dans un tamis et la tamisons pour la séparer des boulets (Figure II.11).

II.2.4.2 Caractérisation chimique de Filler calcaire :

Le Filler calcaire utilisé dans notre étude ou sa composition chimique a été déterminée à l'aide des analyses chimique effectués dans laboratoire chimie de LTPS L'analyse de filler calcaire utilisé a révélé l'existence des éléments qui sont présentés dans les tableaux :

Tableau II.10 : Composition chimique de filler calcaire.

	Echantillon	Filler calcaire
Carbonates [NF P 15-461]	Prise d'essai: m_0 (g)	0,5
	Volume HCl (cm ³)	10
	Chute de NaOH	3,3
	Volume d'acide réagissant $X=V_a - V_b$ (cm ³)	6,7
	Teneur en CaCO ₃ $\frac{5 \cdot X}{m_0}$	67
Insolubles [NFP 15-461]	Prise d'essai : m_0 (g)	1
	Creuset + précipité : m_2	30,869
	Creuset vide m_1	30,831
	%Insolubles : $\frac{(m_2 - m_1) * 100}{m_0}$	3,4
Sulfates [BS 1377 :1990]	Prise d'essai : m_3 (g)	/
	Creuset + précipité : a (g)	/
	Creuset vide : b (g)	/
	$m_2=a-b$ (g)	/
	$SO_3(\%)=0,343*(m_4/m_3)*100$	/

II.2.5 L'eau :

L'eau utilisée pour le gâchage de mortier est Eau Déminéralisée.



Figure II.19 : Eau Déminéralisée.

II.3 Méthode de formulation du mortier cimentaire :

Le mortier de ciment a été mélangé avec bentonite et limestone (filler calcaire), différents pourcentages massique de 5%, 10%, 15% dans des moules cubique avec un rapport constant de $E/L_{qui}=0,7$. Et les moules ont été démontés après une journée. Ensuite, les échantillons ont été placés dans une chambre de durcissement à 20 °C pendant 7, 14, 30 jours.



Figure II.20 : Mortier Cimentaire.



Figure II.21 : Eprouvettes Mortiers de Ciment.

II.4 Méthodes expérimentales :

II.4.1 Variation de la masse :

On mesure la masse à partir des essais au laboratoire, Le principe de cet essai est de mesurer la masse de trois échantillons de chaque gâchée. Les 3 échantillons (1, 2,3) pesées sur une seule et même balance avec une précision de 0.01 g.

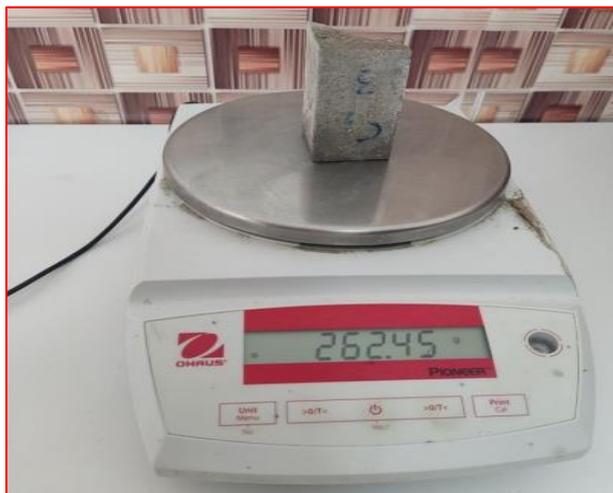


Figure II.22 : Balance de 0.01 g.

II.4.2 Essai de Flexion :

Les essais de flexion simple ont été réalisés au laboratoire LTPS sur une presse, elle est programmée pour les essais de flexion (éprouvette), trois échantillons pour chaque formulation à 7, 14, 30 jours. Nous avons placé l'échantillon confectionné entre les trois points de la presse, le plateau supérieur est posé étant fixe, le plateau inférieur est mobile. Monter vers le haut écrase le corps de l'échantillon contre le plateau supérieur. L'effort est appliqué progressivement à vitesse de chargement constante.

L'essai de flexion est ainsi achevé, la charge maximale est donnée dès que la rupture est enclenchée, cette charge maximale servira à déterminer la résistance qui s'obtient (Figure II.23).

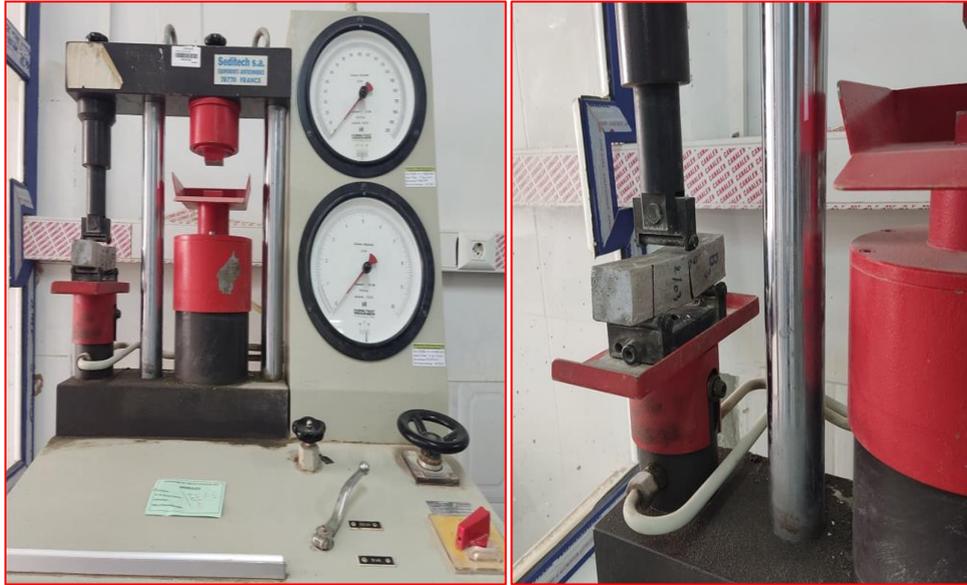


Figure II.23 : Dispositif de Résistance à la Flexion.

II.4.3 Essai de Compression :

Les essais de compression simple ont été réalisés au laboratoire LTPS sur une presse, elle est programmée pour les essais de compression (éprouvette), trois échantillons pour chaque formulation à 7, 14, 30 jours. Nous avons placé l'échantillon confectionné entre les deux plateaux de la presse, le plateau supérieur est posé étant fixe, le plateau inférieur est mobile. Monter vers le haut écrase le corps de l'échantillon contre le plateau supérieur. L'effort est appliqué progressivement à vitesse de chargement constante.

L'essai de compression est ainsi achevé, la charge maximale est donnée dès que la rupture est enclenchée, cette charge maximale servira à déterminer la résistance qui s'obtient (Figure II.24).



Figure II.24 : Dispositif de résistance à la compression.

II.4.4 Absorption capillaire : [NF EN 772-11]

Les mesures de capillarité sont réalisées selon les prescriptions de la norme AFPC- AFREM sur éprouvettes de dimensions 40x40x160 mm. Les échantillons sont d'abord séchés à l'étuve à la température de 55 °C jusqu'à la stabilisation de la masse, puis laissés à l'air libre et pesés à l'aide d'une balance de précision 0.01 g, afin de déterminer leur poids à l'état sec M_0 . Les échantillons sont ensuite placés sur un filet en plastique dans des récipients en plastique peu profonds, contenant de l'eau. La profondeur d'immersion des surfaces d'échantillon pendant le test d'absorption est de 2 à 3 mm. Après chaque échéance de submersion, les échantillons sont prélevés de l'eau, essuyés et séchés superficiellement à l'aide d'un papier absorbant pour enlever l'excès d'eau présente sur la surface puis pesés (M_t). Les mesures de masse et pénétration d'eau sont prises à des intervalles : 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, min et 24 heures. Le coefficient d'absorption capillaire est défini par la relation suivante :

$$C = \frac{M_t - M_0}{A} \dots\dots\dots (4)$$

C : Coefficient d'absorption capillaire (kg/m²),

M_t : Masse de l'éprouvette à l'instant t (kg),

M_0 : Masse initiale de l'éprouvette (kg),

A : Section immergée de l'éprouvette (m²),

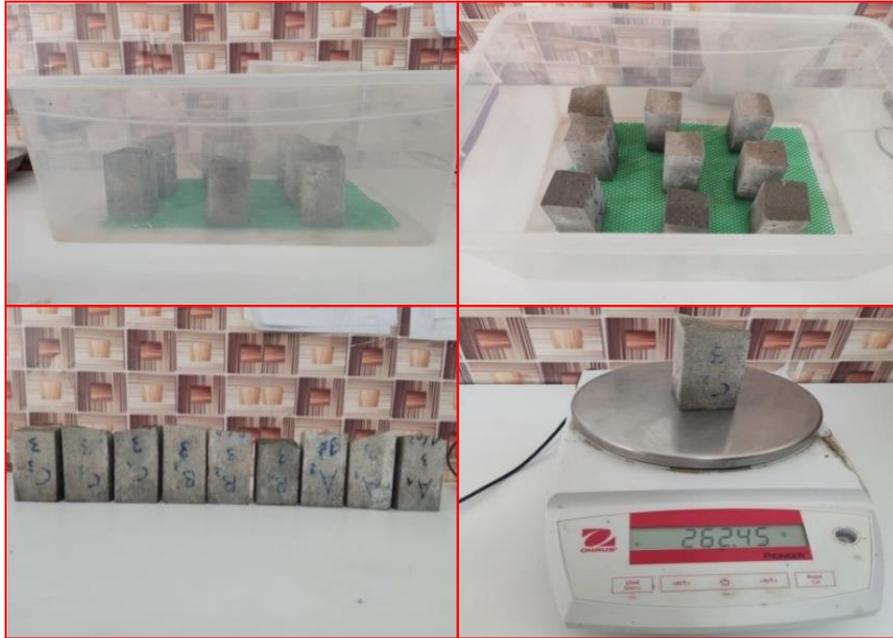


Figure II.25 : L'essai d'absorption Capillaire.

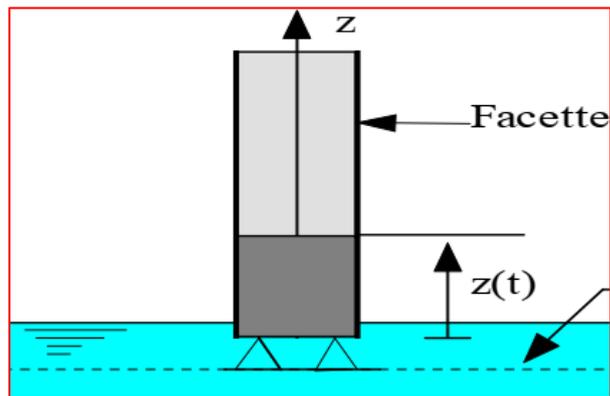


Figure II.26 : Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire.



Figure II.27 : Etuve petit model 500 °C.

II.4.5 Porosité accessible à l'eau : [NF EN 18-459]

La porosité accessible à l'eau a été mesurée selon la recommandation de l'AFPC AFREM. Cette porosité a été estimée en faisant la moyenne de trois valeurs. Les échantillons ont d'abord été séchés dans une étuve à 55 °C, jusqu'à stabilisation de la masse (M_d), puis l'air présent dans les pores de mortier a été évacué à l'aide d'une pompe à vide. La masse des cubes de mortier entièrement saturés a été mesurée sous l'eau (M_{SW}) et dans l'air (M_{SA}). La porosité totale (P) a été calculée en utilisant l'équation :

$$P = (M_{SA} - M_d) \times 100 / (M_{SA} - M_{SW}) \dots \dots \dots (5)$$

Ou :

M_{SA} : est la masse saturée d'eau dans l'air,

M_d : est la masse sèche,

M_{SW} : est la masse saturée d'eau sous l'eau.

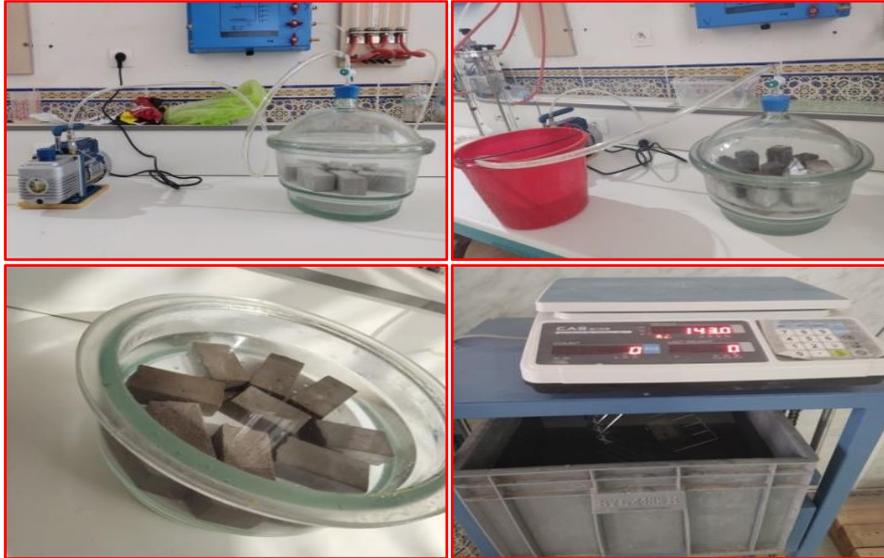


Figure II.28 : Dispositif de Mesure de la Porosité accessible à l'eau.

II.5 Conclusion :

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté les matériaux et les méthodes expérimentales utilisées dans cette étude. Par ailleurs, nous avons détaillé les différentes méthodes de préparation appliquées à la bentonite et limestone (filler calcaire).

Nous avons également montré les protocoles d'essais utilisés dans cette recherche pour la détermination des propriétés physiques (masse volumique, porosité, absorption d'eau), mécaniques (résistance à la traction par flexion et résistance à la compression) de composites cimentaires substitué avec différents pourcentage de bentonite et limestone (filler calcaire).

CHAPITRE III RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

III.1 Introduction :

Ce chapitre résume les résultats des différents essais suivis d'une discussion de ces résultats obtenus sur les mortiers comme : la variation de masse, la résistance de la traction par flexion et la résistance de compression des mortiers pendant une période de 30 jours.

Le but de notre travail est d'étudier l'effet des propriétés mécaniques et physiques de neuf formulations de système ternaire de fillers de calcaire, de bentonite calcinée et de ciment.

Tableau III.1: Un tableau représentant les pourcentages de matériaux utilisés.

Notation		En pourcentage (%)			En gramme (g)				
		Ciment	L	B	C	L	B	Sable	Eau
A1	formulation 1	90%	5%	5%	405	22,5	22,5	1350	315
A2	formulation 2	85%	5%	10%	382,5	22,5	45	1350	315
A3	formulation 3	80%	5%	15%	360	22,5	67,5	1350	315
B1	formulation 4	85%	10%	5%	382,5	45	22,5	1350	315
B2	formulation 5	80%	10%	10%	360	45	45	1350	315
B3	formulation 6	75%	10%	15%	337,5	45	67,5	1350	315
C1	formulation 7	80%	15%	5%	360	67,5	22,5	1350	315
C2	formulation 8	75%	15%	10%	337,5	67,5	45	1350	315
C3	formulation 9	70%	15%	15%	315	67,5	67,5	1350	315

III.2 La masse volumique :

Le tableau (III.1) montre la variation de masse volumique des éprouvettes de mortier en fonction de temps :

Tableau III.2 : Les résultats de masse volumique pour mortier en fonction de temps.

Clay (%)	La masse Volumique (Kg/m ³)		
	7 jours	14 jours	30 jours
A1	2149,69	2144,18	2183,75
A2	2156,95	2160,35	2167,86
A3	2129,69	2153,83	2200,08
B1	2165,12	2162,03	2202,45
B2	2157,46	2164,30	2156,99
B3	2142,38	2129,69	2161,90
C1	2115,98	2132,66	2169,31
C2	2123,75	2132,11	2158,27
C3	2113,75	2124,61	2164,09

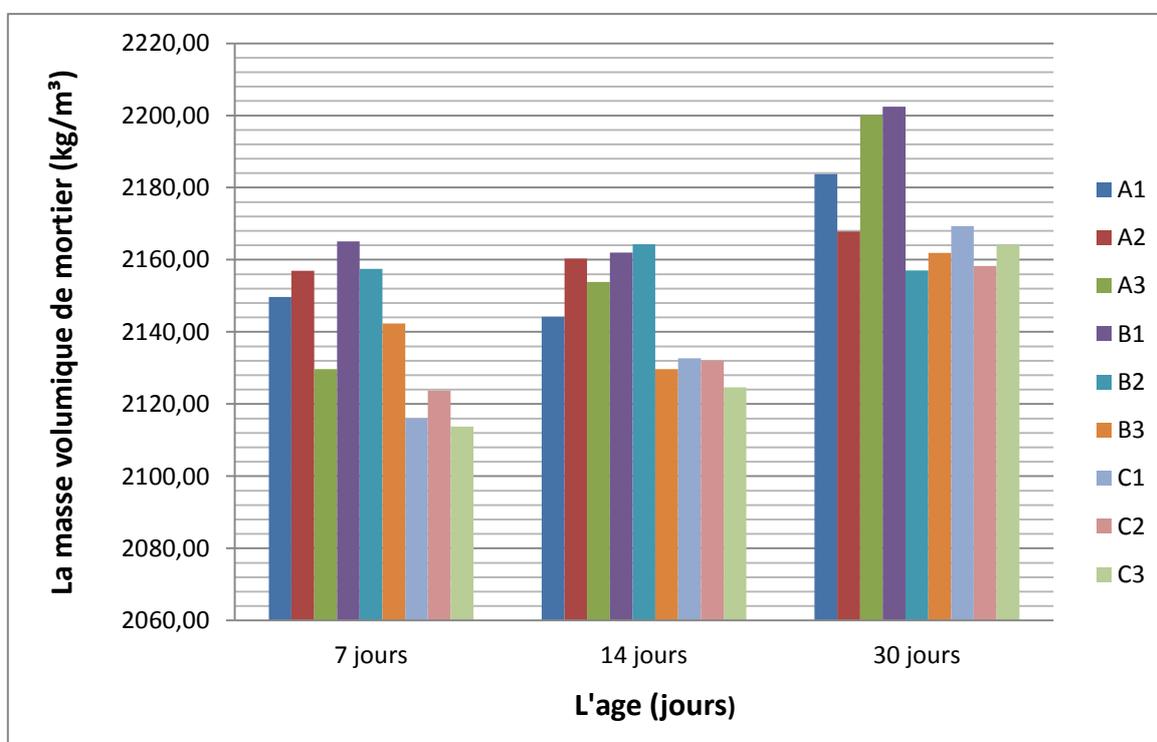


Figure III.1 : Evolution de masse volumique pour le mortier en fonction de temps.

- D'après le tableau (III.1) et la figure (III.1) :

La figure (III.1) montre la variation de la densité de la suspension étudiée à l'état solide.

Les résultats ont été obtenus dans le tableau (III.1), on peut noter ce qui suit:

❖ **En 7 et 14 jours :**

La densité fournit des valeurs très proches, où B1 a obtenu la valeur la plus élevée (2165,12 Kg/m³), avec la présence de proportions de filler calcaire et bentonite (10%,5%).

❖ **En 30 jours :**

La densité fournit des valeurs très proches, où B1 a obtenu la valeur la plus élevée (2202,45 Kg/m³), avec la présence de proportions de filler calcaire et bentonite (10%,5%).

III.3 Résistance de traction par flexion :

Pour comprendre le comportement mécanique des échantillons, des essais de flexion par traction ont été effectués sur les échantillons sciés, suivis de l'essai de pression sur les échantillons cubiques.

Les résultats de ces essais sont représentés dans le (tableau III.2)

Tableau III.3 : Résultats essai de traction par flexion.

clay (%)	RF pour 7 jours (KN)	RF pour 14 jours (KN)	RF pour 30 jours (KN)
A1	1,6	1,8	3,64
A2	1,6	1,72	3,4
A3	1,4	1,88	3,5
B1	1,4	1,72	2,84
B2	1,6	2,04	2,64
B3	1,23	1,68	2,48
C1	1,38	1,64	3,2
C2	1	1,44	2,44
C3	1,1	1,64	1,64

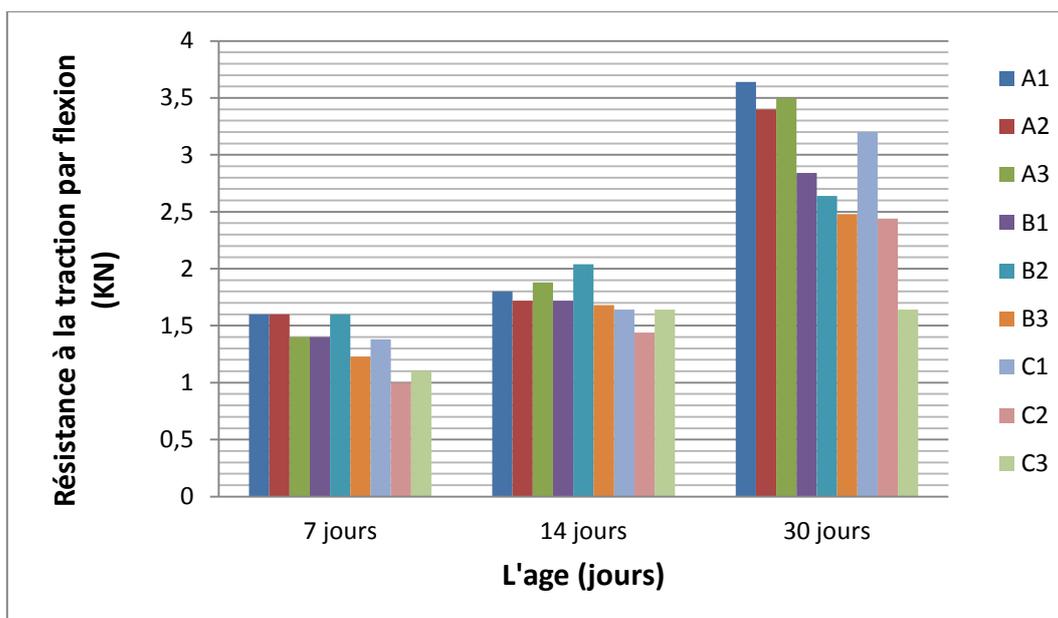


Figure III.2 : Evolution de la résistance à la flexion pour le mortier en fonction de temps.

Pour comprendre le comportement mécanique des échantillons, des essais de flexion par traction ont été effectués sur les échantillons, les résultats de ces essais sont représentés dans le (tableau III.2) et la figure (III.2) :

On remarque que les valeurs de la résistance à la traction par flexion sont proches, où en 7 jours l'échantillon A1 a donné une valeur de résistance élevée (1,6 kN), et c'est avec le mortier pourcentage de (5%, 5%) de filler calcaire et de bentonite, par rapport à l'échantillon C2 a donné la valeur faible (1 kN) avec la présence de proportions (10%,15%) de filler calcaire et bentonite.

Après 14 jours, l'échantillon B2 a donné une valeur de résistance élevée (2,04 kN), et c'est avec le mortier pourcentage de (10%,10%) de filler calcaire et de bentonite, par rapport à l'échantillon C2 a donné la valeur faible (1,44 kN) avec la présence de proportions (10%,15%) de filler calcaire et bentonite.

On remarque que les valeurs de résistance à la traction par flexion sont proches, où en 30 jours l'échantillon A1 a donné la valeur la plus élevée (3,64 kN), et c'est avec le mortier pourcentages de (5%,5%) de filler calcaire et bentonite, par rapport à l'échantillon C3 a donné la valeur faible (1,64 kN) avec la présence de proportions (15%,15%) de filler calcaire et bentonite.

III.4 Résistance à la compression :

Les résultats de ces essais sont représentés dans le (tableau III.3)

Tableau III.4 : Résultats d'essai compression.

clay (%)	RC pour 7 jours (KN)	RC pour 14 jours(KN)	RC pour 30 jours (KN)
A1	20	30	52
A2	22	26	60
A3	20	28	64
B1	20	24	46
B2	23	27	54
B3	15	21	54,5
C1	20	24	49,5
C2	19	20	41,5
C3	15	26	47,5

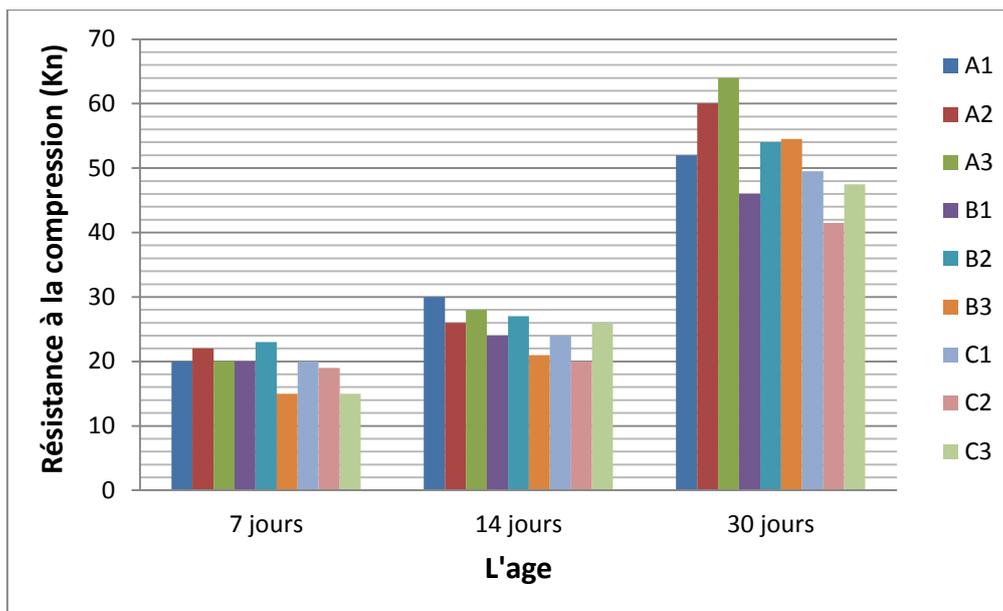


Figure III.3 : Evolution de résistance à la compression pour mortier en fonction de temps.

Pour comprendre le comportement mécanique des échantillons, des essais de flexion par traction ont été effectués sur les échantillons, les résultats de ces essais sont représentés dans le (tableau III.3) et la figure (III.3) :

On remarque que les valeurs de résistance à la compression sont proches, où en 7 jours l'échantillon B2 a donné la valeur la plus élevée (23 Kn), avec des proportions de bentonite et de filler calcaire (10%,10%) par rapport à l'échantillon C3 a donné la valeur faible (15 Kn) avec la présence de proportions (15%,15%) de filler calcaire et bentonite.

Après 14 jours l'échantillon A1 a donné la valeur la plus élevée (30 Kn), avec des proportions de bentonite et de filler calcaire (5%,5%) par rapport à l'échantillon C2 a donné la valeur faible (20 Kn) avec la présence de proportions (15%,10%) de filler calcaire et bentonite.

On remarque que les valeurs de résistance à la compression sont proches, où en 30 jours l'échantillon A3 a donné la valeur la plus élevée (64 Kn), avec des proportions de bentonite et de filler calcaire (15%,5%) par rapport à l'échantillon C2 a donné la valeur faible (41,5 Kn) avec la présence de proportions (10%,15%) de filler calcaire et bentonite.

III.5 Absorption capillaire :

Les figures et les tableaux montrent la quantité d'eau absorbée par unité de surface en fonction du temps, pour les mortiers à différent dosage en deux ajouts (Bentonite et Filler Calcaire).

III.5.1 Résultats et discussion de l'essai d'absorption capillaire du mortier (7 jours) :

Tableau III.5 : Absorption d'eau capillaire par unité de surface de mortier (7 jours).

		Absorption d'eau par capillaire 7 jours (kg/m ²)						
Temps (min)		5	10	15	30	45	60	90
Clay (%)	\sqrt{min}	2,24	3,16	3,87	5,48	6,71	7,75	9,49
	A1		1,612	2,019	2,444	3,381	3,988	4,513
A2		1,656	1,962	2,369	3,287	3,875	4,381	5,288
A3		1,581	2,144	2,312	3,225	3,856	4,331	5,269
B1		1,781	2,344	2,506	3,444	4,125	4,575	5,531
B2		1,744	2,244	2,388	3,238	3,831	4,225	5,031
B3		1,775	2,325	2,437	3,244	3,769	4,237	5,062
C1		1,944	2,494	2,656	3,650	4,238	4,744	5,694
C2		2,094	2,612	2,756	3,656	4,244	4,744	5,656
C3		2,500	2,975	3,075	3,894	4,456	4,913	5,763

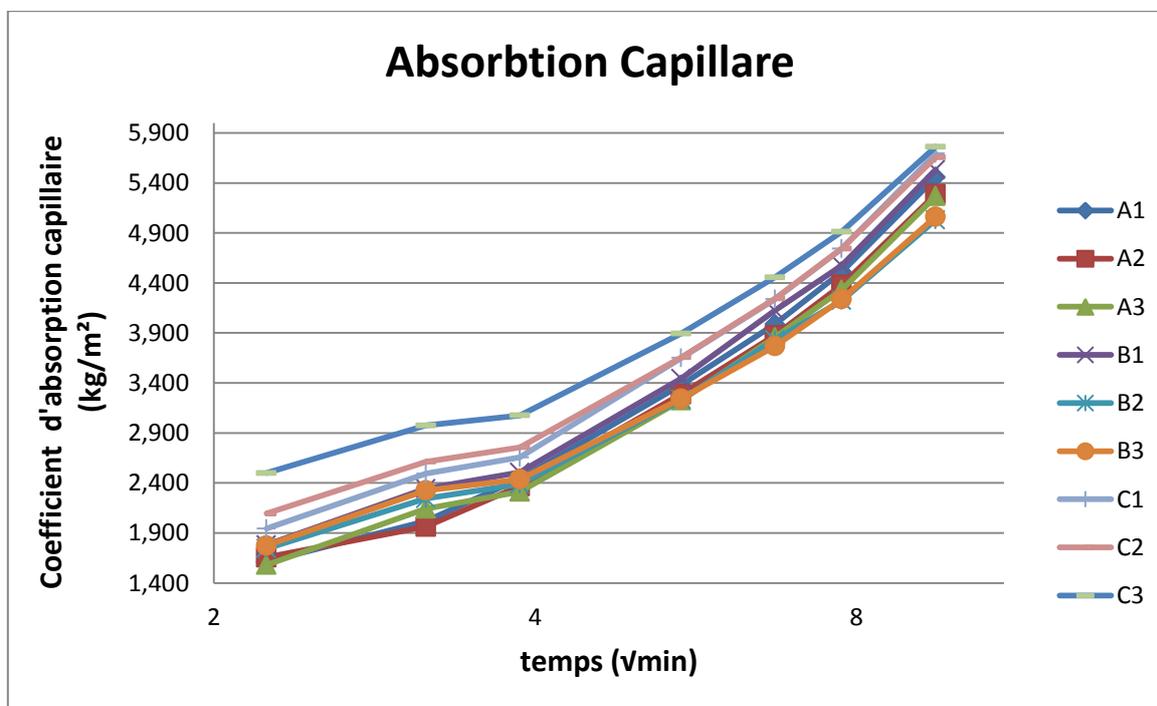


Figure III.4 : Absorption d'eau capillaire par unité de surface de mortier (7 jours).

- D'après le tableau (III.4) et la figure (III.4) :

-En 7 jours , on observe que la quantité d'eau absorbée converge et augmente avec le temps avec la valeur la plus élevée enregistrée (5,763) dans l'échantillon C3 constitué de (15%,15%) de filler Calcaire et bentonite La valeur la plus basse a été enregistrée (5,031) dans l'échantillon B2 qui contient de (10%, 10%) de filler Calcaire et bentonite.

III.5.2 Résultats et discussion de l'essai d'absorption capillaire du mortier (14 jours) :

Tableau III.6 : Absorption d'eau capillaire par unité de surface de mortier (14 jours).

		Absorption d'eau par capillaire 14 jours (kg/m ²)						
Temps (min)		5	10	15	30	45	60	90
Clay (%)	\sqrt{min}	2,24	3,16	3,87	5,48	6,71	7,75	9,49
	A1		1,419	1,650	1,769	2,019	2,256	2,437
A2		1,375	1,575	1,719	2,050	2,275	2,500	2,750
A3		1,331	1,444	1,531	1,875	2,050	2,219	2,494
B1		1,194	1,325	1,469	1,763	1,975	2,138	2,425
B2		1,950	2,056	2,181	2,481	2,650	2,831	3,081
B3		1,100	1,188	1,288	1,556	1,756	1,913	2,131
C1		1,244	1,406	1,550	1,931	2,206	2,419	2,819
C2		1,256	1,369	1,506	1,838	2,069	2,244	2,525
C3		1,269	1,431	1,569	1,863	2,100	2,300	2,556

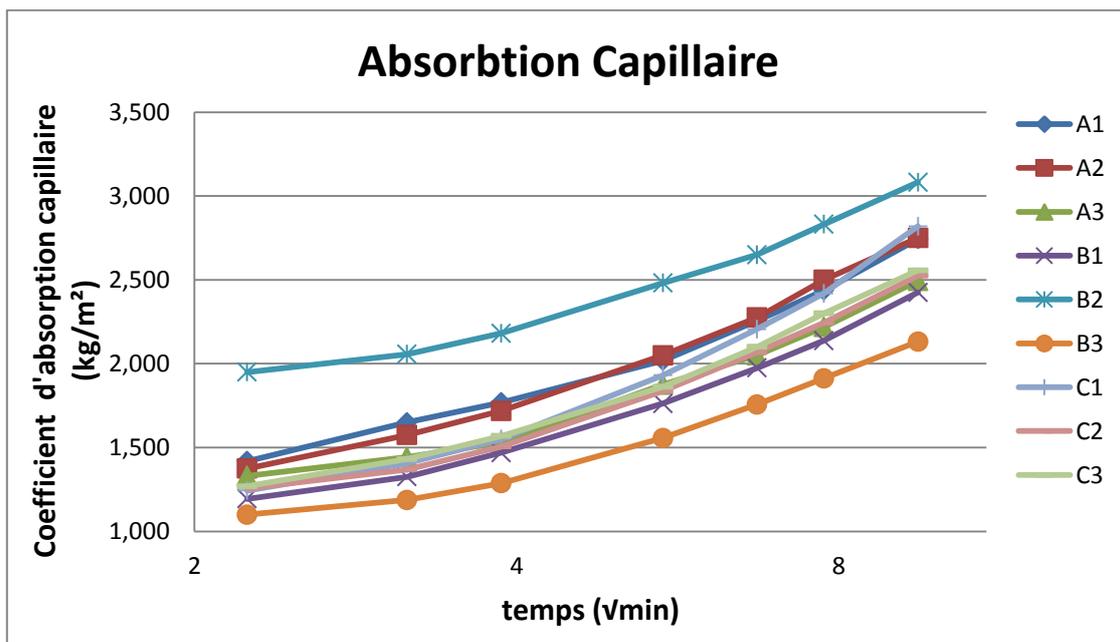


Figure III.5 : Absorption d'eau capillaire par unité de surface de mortier (14 jours).

-En 14 jours, on a observé que la quantité d'eau absorbée convergeait et augmentait avec le temps, mais lentement par rapport aux échantillons de 7 jours Avec la valeur la plus élevée enregistrée de (3,081) dans l'échantillon B2 est constitué de (10%, 10%) de calcaire et de bentonite. La valeur la plus basse (2,131) a été enregistrée dans l'échantillon B3 contenant (10%, 15%) de calcaire et de bentonite.

III.5.3 Résultats et discussion de l'essai d'absorption capillaire du mortier (30 jours) :

Tableau III.7 : Absorption d'eau capillaire par unité de surface de mortier (30 jours).

		Absorption d'eau par capillaire 30 jours (kg/m ²)						
Temps (min)		5	10	15	30	45	60	90
Clay (%)	\sqrt{min}	2,24	3,16	3,87	5,48	6,71	7,75	9,49
	A1		1,056	1,519	1,831	2,644	3,194	3,713
A2		0,281	0,413	0,475	0,894	1,194	1,481	1,931
A3		0,369	0,625	0,612	1,062	1,400	1,644	2,062
B1		0,694	1,150	1,288	2,125	2,456	2,937	3,625
B2		0,562	0,950	1,000	1,544	1,969	2,263	2,794
B3		0,794	1,094	1,263	1,894	2,375	2,844	3,269
C1		0,844	1,169	1,388	1,881	2,444	2,794	3,481
C2		0,544	0,831	1,175	1,650	2,037	2,375	2,925
C3		0,975	1,125	1,337	1,863	2,175	2,506	3,106

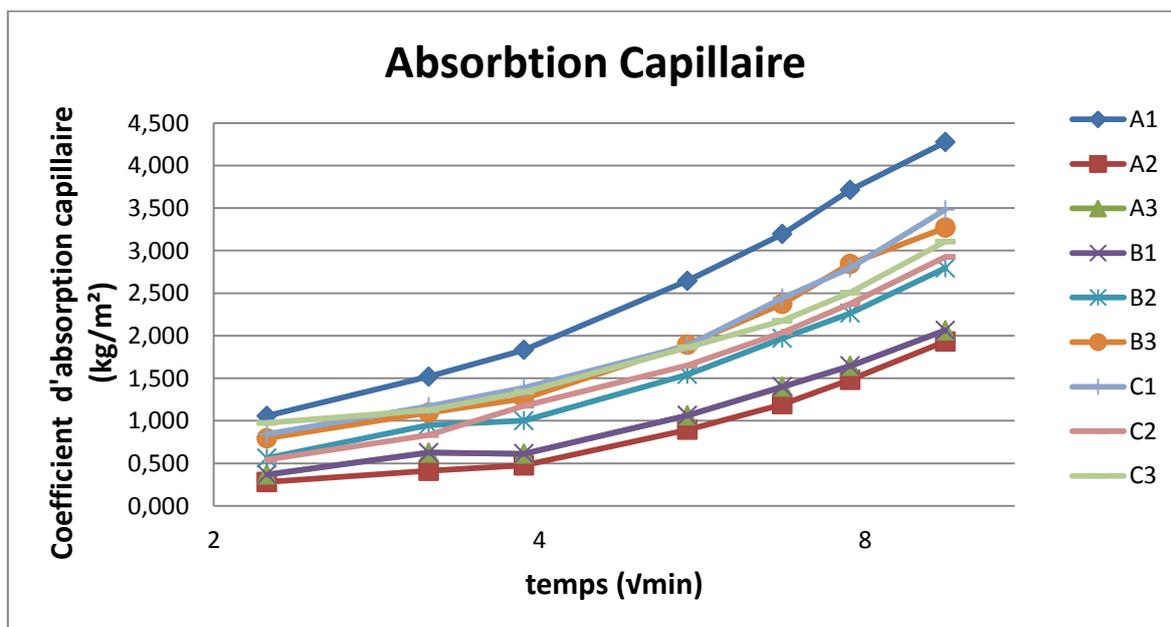


Figure III.6 : Absorption d'eau capillaire par unité de surface de mortier (30 jours).

-En 30 jours, on a observé que la quantité d'eau absorbée par rapport aux échantillons de 14 jours augmentait rapidement au fil du temps, la valeur la plus élevée enregistrée étant de (4,275 kg/m²) dans un échantillon A1 composé de (5%, 5%) de calcaire et de bentonite. La valeur la plus basse de (1,931 kg/m²) a été enregistrée dans un échantillon A2 contenant (5%, 10%) de calcaire et de bentonite.

III.6 Porosité accessible à l'eau :

Le tableau (III.7) montre La porosité accessible à l'eau pour les mortiers avec différent pourcentage de la bentonite et filler calcaire après la cure (7, 14,30) jours.

Les résultats sont présentés dans la Figure (III.7)

Tableau III.8 : Résultats en Porosité accessible à l'eau.

Porosité accessible à l'eau			
	7 jours	14 jours	30 jours
Clay (%)	La Porosité (%)	La Porosité (%)	La Porosité (%)
A1	21,18	14,70	6,50
A2	21,02	13,86	5,75
A3	21,06	12,82	6,18
B1	21,26	15,80	7,24
B2	18,40	14,17	4,98
B3	17,06	14,14	6,20
C1	21,57	16,84	6,45
C2	19,95	17,00	6,32
C3	19,43	14,39	6,45

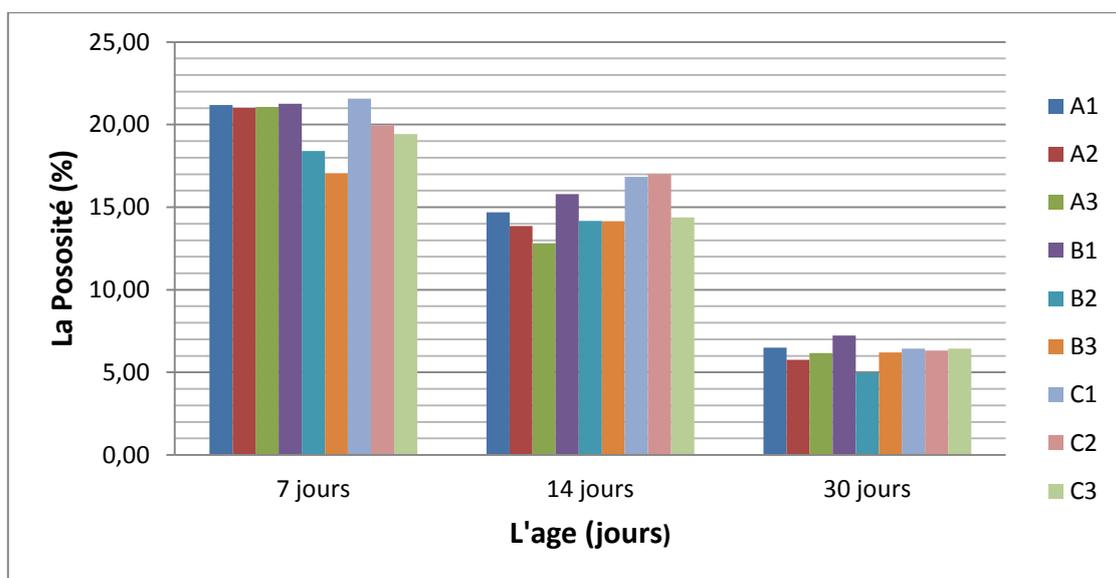


Figure III.7 : Porosité accessible à l'eau.

-D'après le tableau (Tableau III.7) et la figure (Figure III.7), nous notons que Porosité accessible à l'eau le 7 jour a donné des valeurs similaires, et la valeur la plus élevée (21,57 %) a été enregistrée dans l'échantillon C1 qui contient des proportions (15%, 5%) de filler Calcaire et bentonite et la valeur la plus faible (17,06%) était dans l'échantillon B3 qui contient des proportions (10%, 15%) de filler Calcaire et bentonite.

-Le jour 14, nous notons que la valeur la plus élevée dans le Porosité accessible à l'eau était 17% dans l'échantillon C2 contenant un rapport de (15%, 10%) de filler Calcaire et bentonite Par rapport à l'échantillon A3, il a donné la valeur la plus faible de (12,82%) et ce avec lui contenant (5%, 15%) de filler Calcaire et bentonite.

-Le jour 30 Nous notons que le Porosité accessible à l'eau est faible par rapport aux 7 et 14 jours, où la valeur la plus élevée a été enregistrée (7,24%) dans l'échantillon B1 qui contient des proportions (10%, 5%) de filler Calcaire et bentonite et ceci avec une convergence des valeurs avec d'autres échantillons La valeur la plus basse enregistrée (4,98%) dans l'échantillon B2 avec les rapports (10%, 10%) de filler Calcaire et bentonite.

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des travaux expérimentaux sur les mortiers formulés du point de vue caractéristiques mécaniques en compression et en flexion ainsi que l'absorption capillaire, porosité accessible à l'eau, ont été réalisés dans le cadre de notre projet de fin d'études et de donner des interprétations à ces résultats et les justifier.

Dans l'expérience mécanique (pression et traction), nous connaissons le bon rapport qui nous donne une bonne pression et une bonne traction en fonction du pourcentage utilisé pour chaque matériau qui est le mortier A3 qui contient 15 % de bentonite et 5 % de charge calcaire où elle donnait de faibles valeurs dans la proportion d'eau absorbée.

Nous avons remarqué que la densité des échantillons avec différents additifs est approximativement la même en valeur, et La porosité des différents échantillons augmente avec l'augmentation de la proportion de filler Calcaire, ce que nous avons vu dans les échantillons C 1 et C 2 qui ont le pourcentage le plus élevé de charge calcaire.

CONCLUSION GENERALE

Le travail de cette mémoire est une contribution aux travaux de valorisation des matériaux locaux dans les matériaux cimentaires.

L'argile bentonite a été calcinée à températures de 750°C avec une rampe de 5 °C par/mn, cette énergie est inférieure à celle nécessaire pour la fabrication de ciment, ainsi la diffusion du dioxyde de carbone est réduite dans l'atmosphère.

Notre étude a permis de confirmer la possibilité de valoriser l'argile de type montmorillonite (bentonite) en tant que matériau substituable partiellement au ciment, il a été substitué avec différentes teneurs massique avec le filler calcaire (5%, 10%, 15%).

Pour la masse volumique des échantillons, il est noté que la densité des mélanges avec différents additions sur mortier est de valeur approximativement similaire.

Pour la résistance à la compression et à la flexion, les résultats ont montré que la meilleure résistance est obtenue par un mortier contenant 15 % de bentonite et 5 % de filler calcaire.

L'explication de ces résultats est que plus la proportion de bentonite est élevée et plus la proportion de filler calcaire est faible, plus la résistance est importante.

La quantité d'eau absorbée par toutes les compositions testées augmente progressivement avec le temps. L'échantillon à haute résistance a donné une faible valeur dans la proportion d'eau absorbée. Il est noté que le coefficient d'absorption capillaire donne une idée sur les caractéristiques physiques des mortiers: le coefficient d'absorption augmente avec l'augmentation de la porosité.

La porosité des échantillons de différents mélanges diminue progressivement pendant la période d'hydratation (7, 14 ,28) jours. Les résultats de l'absorption d'eau qui nous ont été donnés ont presque prouvé que la quantité d'eau absorbée augmente avec l'augmentation de pourcentage de filler calcaire.

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que la bentonite calcinée combinée avec le filler calcaire permet d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques des produits cimentaires. En d'autres, ils peuvent être utilisés comme produits de remplacement partiel pour le ciment Portland, mais avec un teneur bien précis.

Compte tenu de l'évolution générale vers l'utilisation de produits à haute qualité environnementale, la bentonite peut être valorisée et utilisée pour des matériaux de construction en respectant au mieux la ressource naturelle de l'environnement.

Perspectives :

Cette étude expérimentale reste limiter et peut être compléter par l'investigation de :

Utiliser d'autres types d'ajouts disponibles en Algérie pour la valorisation dans le mortier et autres.

Étudier l'effet des combinaisons des ajouts minéraux avec différents pourcentages sur le mortier.

ANNEXE A



Mokaouem
مقاوم بلوس Plus

ALGÉRIE

LAFARGE
Construire
des villes meilleures™



Ciment Portland

NA 442 - CEM I 42,5 N-SR3

Mokaouem est un ciment gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de gypse inférieure à celle d'un ciment portland composé.

Mokaouem
NA 442 - CEM I 42,5 N-SR3

Mokaouem NA 442 -CEM I 42,5 N-SR3 selon la NA 442 v 2013 et la EN 197-1II est conforme à la norme nationale NA 442 v 2013 et à la norme Européenne EN 197-1 avec un taux en C3A < 3%.

AVANTAGES PRODUIT



- Tout en étant un ciment de haute performance, **Mokaouem** protège la structure contre les agressions chimiques de l'environnement externe.
- Une meilleure durabilité pour les structures en béton.
- Une faible chaleur d'hydratation.

LAFARGE A member of
LafargeHolcim

APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Les fondations et les structures à réaliser dans un milieu agressif
- Les travaux maritimes
- Les stations de dessalement et d'épuration
- Les travaux hydrauliques
- Les barrages et les digues de soutènement collinaire



FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment 	Sable (sec) 	Gravillons (sec) 	Eau (litres) 
Dosage pour béton C25/30	X 1 	X7 	X5  + X4 	25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

Formulation de béton à suivre dans le cas de l'absence d'une étude délivrée par un laboratoire*

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

• Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	0,5 à 3 %
Teneur en sulfates (SO3) (%)	1,8 à 3
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1,2 à 3
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	0,01 à 0,05

• Temps de prise à 20° (NA 230)

	Valeur
Début de prise (min)	> 60
Fin de prise (min)	240 à 400

• Composition minéralogique

	Valeur
Taux d'aluminate C3A	<3.0%

• Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥10
28 jours (MPa)	≥42.5

• Propriétés physiques

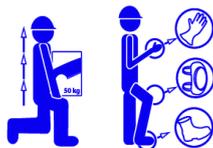
	Valeur
Consistance Normale (%)	25 à 28
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3200 à 3800
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
Expansion (mm)	≤2,0
Chaleur d'hydratation	<270j/g

Ces valeurs sont données à titre indicatif et ne peuvent être considérées comme absolues

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.



A member of
LafargeHolcim

Conditionnement:  / 

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
dz.satisfaction-clients@lafargeholcim.com
Tél: 021 98 55 55

LAFARGE
لافارج

ANNEXE B

FICHE TECHNIQUE

BENTONITE DE FONDERIE

Composition Chimique

SiO ²	55 - 65	%
Al ² O ³	12 - 18	%
Na ² O ³	1 - 3	%
CaO	1 - 5	%
K ₂ O	0,76 – 1,75	%
MgO	2 - 3	%
PAF	6,9	%

Caractéristiques Physiques

Humidité	10	% max
Absorption au bleu de méthylène à 25 °C	26	ML
Compression à vert	1047	g/cm ²
Compression à sec	3200	g/cm ²
Cisaillement	190	g/cm ²

Granulométrie

74 µm granulométrie	98	% min
Résidu sur tamis 74 µm	2	% du poids max

Emballage

Palette de 1,25 tonnes
Big bag de 1,25 tonnes
Sac de papier Kraft de 50 kg

Livraison

Enlèvement par le client ou livraison

ANNEXE C

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ANALYSE CHIMIQUE DETERMINATION DES INSOLUBLES NF P 15-461

Structure : Lieu de travail :
 N° Dossier interne : Date :
 Echantillon : Opérateur :
 Équipements utilisés : N° D'inventaire :

Echantillon	Bentonit braque	filler Calcaire	Sable				
Prise d'essai : m_0 (g)	1g	1g	1g	1g			
Creuset+précipité : m_2 (g)	29,483	26,485	30,869	29,827			
Creuset vide : m_1 (g)	28,718	25,66	29,831	28,901			
% Insolubles : $\frac{(m_2 - m_1) \times 100}{m_0}$	76,5	82,5	3,4	92,6			

L'Opérateur

Visa du responsable

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

**ANALYSE CHIMIQUE
DETERMINATION DES SULFATES
BS 1377: 1990**

Structure :
 N° Dossier interne :
 Echantillon :
 Equipements utilisés :

Lieu de travail :
 Date :
 Opérateur :
 N° D'inventaire :

Echantillon	Bentonit	bruyère							
Prise d'essai : m ₃ (g)	1g	1g	1g	1g					
Creuset+précipité : a (g)	29,909	30,039							
Creuset vide : b (g)	29,902	30,012							
m ₄ = a - b (g)	0,007	0,027							
SO ₃ (%) = 0.343 x (m ₄ /m ₃) x 100	0,24	0,95							

L'Opérateur

Visa du responsable

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

**ANALYSE CHIMIQUE
DOSAGE EN RETOUR DES CARBONATES
NF P 15-461**

Structure : Lieu de travail :
 N°Dossier interne : Date :
 Echantillon : Opérateur :
 Equipements utilisés : N°D'inventaire :

Echantillon	braque	filler calcaire	Sable	Bentonite				
Prise d'essai : m_0 (g)	0,5g	0,5g	0,5g	0,5g				
Volume HCl : V_a (cm ³)	10	10	10	10				
Chute de NaOH : V_b (cm ³)	10	3,3	9,5	9,6				
Volume d'acide réagissant $X = V_a - V_b$ (cm ³)	0	6,7	0,5	0,4				
Teneur en CaCO ₃ $\frac{5 \cdot X}{m_0}$	00	67	05	04				

L'Opérateur

Visa du responsable

F-5-5cb.02