

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



**Université de Ghardaïa**

N° d'ordre :  
N° de série :

**Faculté des Sciences et Technologies  
Département D'hydraulique et de Génie Civil**

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER**

**Domaine : Sciences et Technologies**

**Filière : Génie Civil**

**Spécialité : Structures**

**Par :**

MOULAY OMAR Karima

BELMAZOUZI Rahma

**Thème**

Activation thermique de la Bentonite : Une Alternative Pour  
Produire des Mortiers Cimentaires Durables :  
Influence de la haute température de cure.

**Membres de jury :**

**Mr LAROUÏ Abdelbasset**

**MAA**

Université de Ghardaïa

**Examineur**

**Mr SAÏTI Issam**

**MAA**

Université de Ghardaïa

**Examineur**

**Mr AZIEZ Mohammed Nadjib**

**MAB**

Université de Ghardaïa

**Encadrant**

**Année universitaire 2021/2022**

# Remerciement

**Nous remercions Allah de nous avoir donné la force et la volonté d'atteindre notre objectif et nous a aidé à réaliser ce travail.**

**En tout premier lieu, nous voudrions profiter de cette occasion pour remercier notre tuteur de Mr : M. NADJIB AZIEZ enseignant à l'Université de Ghardaïa, Nous tenons à lui exprimer notre gratitude, ce travail n'aurait pas sans s'aide et ses précieux conseils, sa disponibilité, ses encouragements, sa confiance et sa patience lors de la préparation de cette mémoire**

**Nous tenons à remercier toutes ceux qui ont contribué de proche où de loin dans notre formation.**

**Nous adressons aussi nos remerciements à monsieur le Directeur et Tout les personnels du laboratoire des travaux publics du sud Ghardaïa (LTPS SUD) pour leur aide et leur disponibilité.**

**Nous voulons manifester toute nos reconnaissances à tous nos enseignants Et le personnel administratif du Département de l'hydraulique et de génie civil de Université de Ghardaïa.**

**Nous terminons en remerciant du tout nos cœurs nos familles qui nous ont soutenu durant nos études et qui nous ont toujours encouragé.et à tous mes amis, qui mon soutenue.**

# **Dédicaces**

**À nos parents**

**À nos soeurs et frères**

**À toute nos famille Belmazouzi et Moulay Omar**

**À tous nos amis**

**À tous ceux qui nous sont chers**

# Résumé :

La construction est généralement considérée comme le principal consommateur de matières premières à base de ciment, et la possibilité de substituer une partie du ciment par des additions minérales tels que la bentonite et le filler calcaire est une solution prometteuse pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> dues à la production de clinker, et c'est ce que nous recherchons dans cette étude.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet du filler calcaire et de la bentonite calcinés à 750 °C sur les propriétés physiques et mécaniques du mortier. Nous avons substitué (10% ,15%, 20%,25%,30%) du poids de ciment par différents pourcentages de système combiné de bentonite calcinée et de filler calcaire (5%, 10%, 15%), des essais mécaniques et physiques a été fait après une cure de 7, 14 , 30 jours dans la chaux à 45 °C.

Les résultats obtenus sont satisfaisants, en particulier pour le mortier qui contient 5% de filler calcaire et 15% de bentonite calcinée, ce qui est le bon pourcentage pour une meilleure résistance à long terme.

**Mots clés :** bentonite calcinée, filler calcaire, mortier, traité thermiquement

## الملخص:

يعتبر البناء بشكل عام المستهلك الرئيسي للمواد الخام القائمة على الاسمنت ، وإمكانية استبدال جزء من الأسمنت بإضافات معدنية مثل البنتونيت والحجر الجيري هي حل واعد لتقليل انبعاث CO<sub>2</sub> بسبب إنتاج الكلنكر " وهذا ما نسعى إليه في هذه الدراسة .

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير حشو الحجر الجيري والبنتونيت المكلس عند 750 درجة مئوية على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للملاط. استبدلنا (10% ، 15% ، 20% ، 25% ، 30%) من وزن الأسمنت بنسب مختلفة من النظام المركب من البنتونيت المكلس وحشو الحجر الجيري (5% ، 10% ، 15%) ، وتم إجراء الاختبارات الميكانيكية والفيزيائية بعد علاج لمدة 7 ، 14 ، 30 يومًا في الجير عند 45 درجة مئوية.

سوف ندرس إمكانية استبدال نسبة (10% , 15% , 20% , 25% , 30%) من وزن الاسمنت بنسب مختلفة من البنتونيت المكلس و حجر الجيري (5% , 10% , 15%) و نقوم بإجراء التجارب الميكانيكية والفيزيائية عليها بعد (7,14,30 يوم ) وهذا بعد المعالجة الحرارية و التي لعبت دورا مهما في زيادة المقاومة والمتانة .

النتائج المحصل عليها مرضية وخاصة بالنسبة للملاط الذي يحتوي على 5 % الحجر الجيري و 15 % بنتونيت المكلس و هي النسبة الصحيحة للمقاومة أفضل على المدى الطويل .

### كلمات مفتاحية :

البنتونيت المكلس , الحجر الجيري , الملاط , المعالجة الحرارية

# Abstract:

Construction is generally considered to be the main consumer of cement-based raw materials, and the possibility of substituting part of the cement with mineral additions such as bentonite and limestone is a promising solution to reduce CO<sub>2</sub> emissions due to clinker production, and that is what we are looking for in this study.

The objective of this work is to study the effect of limestone filler and bentonite calcined at 750°C on the physical and mechanical properties of the mortar. We substituted (10%, 15%, 20%, 25%, 30%) of the cement weight by different percentages of combined system of calcined bentonite and limestone filler (5%, 10%, 15%), mechanical and physical tests was made after curing for 7, 14, 30 days in lime at 45°C.

The results obtained are satisfactory, in particular for the mortar which contains 5% limestone and 15% calcined bentonite, which is the right percentage for better long-term resistance.

**Keywords:** calcined bentonite, limestone filler, mortar, heat treated

## TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS.</b>	<b>I</b>
<b>DEDICACES</b>	<b>II</b>
<b>RESUME</b>	<b>III</b>
<b>ملخص</b>	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>V</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b>	<b>VI</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>X</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
CONTEXTE	<b>3</b>
REFERENCES	<b>4</b>
<b>CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	<b>5</b>
I.1 Introduction :	<b>5</b>
I.2. Généralité sur Ciment :	<b>5</b>
I.2.1. Historique du ciment :	<b>5</b>
I.2.2. Matières premières :	<b>6</b>
I.2.3. Processus de fabrication du ciment :	<b>7</b>
I.2.3.1. Extraction et préparation des matières premières :	<b>7</b>
I.2.3.2. Broyage cru :	<b>8</b>
I.2.3.3. Cuisson de la farine et stockage de clinker :	<b>8</b>
I.2.3.4. Stockage, ensachage et expédition:	<b>10</b>
I.2.4. Classification des ciments en fonction de leur composition :	<b>11</b>
I.3. Type de ciments :	<b>11</b>
I.4. Hydratation du ciment Portland :	<b>12</b>
I.4.1. Hydratation du C3S et C2S :	<b>12</b>
I.4.2. Hydratation des C3A et C4AF :	<b>12</b>
I.5. Réactivité des autres constituants du ciment (les additions minérales) :	<b>13</b>
I.5.1. La pouzzolane (Z) :	<b>13</b>
I.5.2. Laitier granulé de haut-fourneau (S) :	<b>14</b>
I.5.3. Fumée de silice (D) :	<b>14</b>
I.5.4. Filler Calcaire :	<b>15</b>
I.5.4.1. Rôle des Fillers calcaires :	<b>16</b>
I.6. Argiles :	<b>16</b>
I.6.1. Les grandes familles de minéraux argileux :	<b>17</b>
I.6.1.1. La kaolinite :	<b>17</b>
I.6.1.2. Les montmorillonites :	<b>18</b>
I.6.1.3. Les illites :	<b>18</b>
I.6.2. Classification des types et nomenclature des minéraux argileux :	<b>18</b>
I.7. Activation des argiles :	<b>19</b>
I.7.1. Activation thermique :	<b>19</b>
I.7.2. Activation chimique aux acides :	<b>19</b>
I.8. Domaines d'application des argiles :	<b>20</b>
I.9. Argiles calcinées :	<b>20</b>
I.9.1. Mode d'obtention :	<b>21</b>

I.10. Influence de la température de cure :	21
I.10.1. Chaleur d hydratation :	21
I.10.2. Influence la vitesse des réactions :	22
I.11. Conclusion :	24
I.12. Références.	25
<b>CHAPITRE II : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES</b>	<b>30</b>
II.1. Introduction :	30
II.2. Caractérisation des matériaux utilisés :	30
II.2.1. Ciment :	30
II.2.2. Sable :	31
II.2.2.1. Equivalent de sable :	32
II.2.2.2. Teneur d'eaux :	34
II.2.2.3. Analyses granulométrie :	34
II.2.2.4. Module de finesse :	36
II.2.2.5. Masse volumique apparente :	37
II.2.3. Eau :	37
II.2.4. Bentonite :	38
II.2.5. Filler calcaire :	40
II.2.6. Caractérisation chimique des matériaux :	41
II.3. Méthode de formulation de mortier cimentaire :	45
II.4. Méthodes expérimentales :	48
II.4.1. Variation de la masse :	48
II.4.2. Essai de flexion et de compression :	49
II.4.3. Essai de flexion :	50
II.4.4. Essai de compression :	50
II.4.5. Porosité accessible à l'eau :	51
II.4.6. Absorption capillaire :	52
II.5. Conclusion :	53
II.6. Référence :	54
<b>CHAPITRE III: RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS</b>	<b>55</b>
III.1 Introduction :	55
III.2 La Masse volumique :	55
III.3 Resistance a la Compression :	56
III.4 Résistance à la Flexion :	58
III.4 Porosité accessible a l'eau :	59
III.5 Absorption capillaire d'eau :	60
III.6 Conclusion :	64
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>65</b>
<b>ANNEXE A</b>	<b>67</b>



## LISTE DES FIGURES

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	
Figure 1. Les émissions de CO <sub>2</sub> .	<b>1</b>
Figure 2- les gaz à effet de serre.	<b>2</b>
Figure 3. Notamment le laitier granulé de haut fourneau et les cendres volantes	<b>2</b>
<b>CHAPITRE I ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
Figure I. 1: Schéma de la fabrication du ciment [10].	<b>7</b>
Figure I. 2 : Extraction et préparation des matières premières.	<b>8</b>
Figure I. 3 : Broyeur.	<b>8</b>
Figure I. 4 : Zone de cuisson.	<b>9</b>
Figure I. 5 : Four rotatif.	<b>9</b>
Figure I. 6 : Expédition en sac	<b>10</b>
Figure I. 7 : Expédition en vrac.	<b>10</b>
Figure I. 8 : Représentation schématiquement les constituants anhydres du clinker et des produits d'hydratation [22]	<b>13</b>
Figure I. 9 : Pouzzolane naturelle	<b>13</b>
Figure I.10. Laitier granulé de haut-fourneau.	<b>14</b>
Figure I.11. Fume de silice.	<b>15</b>
Figure I.12. Filler calcaire.	<b>16</b>
Figure I.13 Argile.	<b>16</b>
Figure I. 14 : Représentation schématique de la structure de kaolinite [31].	<b>17</b>
Figure I. 15 : Représentation schématique de la structure de l'illite [31]	<b>18</b>
Figure I. 16 : Schéma d'un cycle de traitement thermique [43].	<b>21</b>
Figure I. 17 : Influence de la température sur l'hydratation et les résistances en compression au cours du temps.	<b>23</b>
<b>CHAPITRE II MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES</b>	
Figure II. 1: Sac de ciment CEM I / A 42,5.	<b>30</b>
Figure II. 2 : Sable d'Oued M'Zi	<b>31</b>
Figure II. 3 : Résultat de l'essai de l'équivalente de sable.	<b>32</b>
Figure II. 4 : sable d'essai Teneur d'eaux.	<b>34</b>
Figure II. 5 : Analyses granulométrie.	<b>35</b>
Figure II. 6 : Courbe granulométrique (sable de Laghouat).	<b>36</b>
Figure II. 7 : récipient rempli par le sable.	<b>37</b>
Figure II. 8 : L'eau distillée.	<b>38</b>
Figure II. 9 : Bentonite après le séchage.	<b>38</b>
Figure II. 10 : Micro-Deval.	<b>38</b>
Figure II. 11 : la bentonite et de boules sphériques à l'intérieur du cylindre.	<b>39</b>

Figure II. 12 : la bentonite après un broyage mécanique.	39
Figure II. 13 : Four à moufle.	40
Figure II. 14 : filler calcaires après le séchage.	40
Figure II. 15 : Filler calcaires et de boules sphériques à l'intérieur du cylindre.	41
Figure II. 16 : Moules ayant servi à la fabrication des éprouvettes.	46
Figure II. 17 : Ciment et filler et bentonite.	47
Figure II. 18 : Mixeur de mortier.	47
Figure II. 19 : Table à secousse	47
Figure II. 20 : Échantillons du mortier avant démoulés.	48
Figure II. 21 : Échantillons du mortier l'immerge dans solution de la chaux.	48
Figure II. 22 : Conservation à 45 °C.	48
Figure II. 23 : Balance 0.01g.	49
Figure II. 24 : Conservation à 45 °C.	49
Figure II. 25 : Machine de compression/flexion.	50
Figure II. 26 : Essai de résistance à la flexion.	50
Figure II. 27: Essai de résistance à la compression.	51
Figure II. 28 : Appareil vide l'air	52
Figure II. 29 : Balance de l'eau.	52
Figure II. 30 : Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire.	53
<b>CHAPITRE III RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS</b>	
Figure III. 1: La Masse volumique kg/m <sup>3</sup> .	56
Figure III. 2: Résistance à la compression (KN) après 7, 14 et 30 jours.	57
Figure III. 3 : Résultats de Résistance à la Flexion (KN) après 7, 14 et 30 jours.	58
Figure III. 4 : Résultats de Porosité accessible à l'eau après 7, 14 et 30 jours.	60
Figure III. 5: Absorption capillaire d'eau après 7 jours	61
Figure III. 6: Absorption capillaire d'eau après 14 jours	62
Figure III. 7 : Absorption capillaire d'eau après 30 jours.	63

## LISTE DES TABLEAUX

<b>CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
Tableau I. 1 : Composition du cru.	<b>6</b>
Tableau I. 2 : Caractéristiques du four rotatif.	<b>10</b>
Tableau I. 3: Phases principales du ciment Portland et leurs caractéristiques [13].	<b>11</b>
<b>CHAPITRE II : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES</b>	
Tableau II. 1 : Composition chimique et propriétés physiques du ciment.	<b>31</b>
Tableau II. 2 : Résultat de l'essai de l'équivalente de sable.	<b>33</b>
Tableau II. 3 : Comparaison des résultats. [5]	<b>33</b>
Tableau II. 4 : Analyse granulométrique de sable Laghouat.	<b>35</b>
Tableau II. 5 : Masse volumique apparente du sable de Laghouat.	<b>37</b>
Tableau II. 6 : mode opérations des analyses chimiques des matériaux (Filler calcaire et sable et bentonite).	<b>41</b>
<b>CHAPITRE III : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS</b>	
Tableau III. 1: Formulation des mortiers étudiés	<b>55</b>
Tableau III. 2 : La Masse volumique.	<b>56</b>
Tableau III. 3 : Résultats de Résistance à la compression (KN) après 7, 14 et 30 jours	<b>57</b>
Tableau III. 4 : Résultats de Résistance à la Flexion (KN) après 7 , 14 et 30 jours	<b>58</b>
Tableau III. 5: Résultats de Porosité accessible à l'eau après 7, 14 et 30 jours.	<b>59</b>
Tableau III. 6: Absorption capillaire d'eau après 7 jours.	<b>61</b>
Tableau III. 7 : Absorption capillaire d'eau après 14 jours	<b>62</b>
Tableau III. 8 : Absorption capillaire d'eau après 30 jours.	<b>63</b>

---

## INTRODUCTION GENERAL

La production mondiale du ciment a augmenté ces dernières décennies. Elle est passée de 2,6 milliards de tonnes en 2006 à 4,2 milliards de tonnes en 2016, L'industrie du ciment est considérée comme une industrie capitaliste. Le coût d'investissement représente un facteur prééminent dans l'industrie mondiale du ciment : il faut près de 150 millions EUR pour construire une installation industrielle d'une capacité annuelle de 1 million de tonnes. Les cimentiers peuvent être amenés à améliorer les rendements de l'installation nouvellement construite, juste après sa mise en fonctionnement, dans le but de rester compétitif sur le marché du ciment [1].



Figure 1. Les émissions de CO<sub>2</sub>[3].

La production de ciment nécessite une grande énergie qui conduit à la libération d'une quantité importante de CO<sub>2</sub>. Le CO<sub>2</sub> contribue à environ 65% du réchauffement climatique. L'industrie du ciment contribue à environ 7% à effet de serre des émissions de gaz à l'atmosphère de la terre [2] (Émissions de Gaz à Effet de Serre) (Figure 1 et 2) et leur impact environnemental vis-à-vis notamment des fortes libérations de CO<sub>2</sub> [3,4].

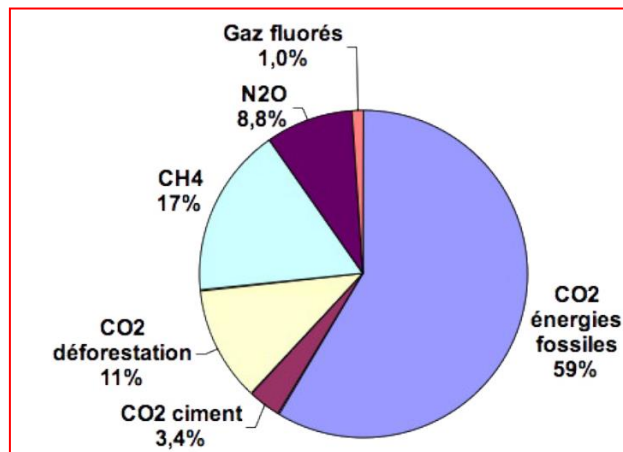


Figure 2- les gaz à effet de serre [7].

Le remplacement partiel du clinker est envisagé par des matériaux cimentaires complémentaires (SCM) est une manière généralement acceptée de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> associées à la production de ciment. Les SCM les plus largement utilisés aujourd'hui, notamment le laitier granulé de haut fourneau et les cendres volantes (Figure 3), sont cependant des sous-produits industriels dont la disponibilité est limitée, et par conséquent, le degré maximal de substitution du clinker est parfois dicté par la quantité de SCM disponible et sa réactivité [5, 6].



Figure 3. Notamment le laitier granulé de haut fourneau et les cendres volantes [6].

Une alternative prometteuse pour les SCM courants peut être vue dans le groupe des argiles activées en raison de la bonne disponibilité de la matière première.

D'une manière générale, la littérature sur l'activation des minéraux argileux et leur utilisation en génie civil est très riche et couvre un large éventail de problématiques. Tout d'abord, elle se concentre sur les argiles calcinées utilisées comme additions

---

dans les liants, où le ciment est le composant dominant, et dans le béton à base de ciment.

Cependant, une meilleure compréhension des paramètres de d'activation qui déterminent les propriétés des argiles calcinées, nécessite des données supplémentaires. Par conséquent, la présente étude présente une évaluation technologique de deux types d'activation : processus mécanique, suivi par processus thermique sur la bentonite, des mortiers de ciment mélangé fabriqués à partir de la bentonite activé ont été testés, y compris la détermination les caractéristiques physiques et mécaniques.

### **Contexte :**

Le manuscrit est structuré en trois chapitres en plus du présent parti par l'introduction générale et des dernières parties consacrées à la conclusion, Ces trois Les chapitres sont résumés de la façon suivante :

- La première chapitre de ce travail, une synthèse bibliographique des connaissances sur types du ciment Portland, sur les principales familles des ajouts minéraux d'argile et leurs utilisations et l'activation en mettant l'accent sur le processus de calcination et influence de températures.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'identification des matériaux utilisés (sable, filler calcaire, eaux, bentonite calcination et ciment). Ainsi une caractérisation physico-chimique, a été effectuée en plus essais de sable, mélanges des mortiers.
- Le troisième chapitre une synthèse des résultats expérimentaux obtenus dans d'étudie l'influence les caractéristiques physiques et mécaniques a les échantillons de mortier.

---

**Référence :**

- [1] Baby-Jean Robert Mungyeko Misulandu, “Modélisation de l’apport d’énergie par combustibles alternatifs dans les fours tournants de production de ciment”, thèse de docteur, Université de Pau et des Pays de l’Adour, 2018, page 6-7-11.
- [2] BOULIFA Marwa et DEBABI Adel,” Utilisation de poudre de verre dans le mortier”, Mémoire MASTER, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2016/2017, Page 1
- [3] Sami ZIANE 2021/2022, Master 1 Structure Matériaux innovants “Chapitre 2. Liants alternatifs et produits de substitution”.
- [4] Mohamed Benaïssa, Karim Bendania, Nadia Belas, Khalil Belguesmia et Hanifi Missoum, “Effet de l’ajout de la bentonite sur les propriétés des mortiers et des bétons auto-plaçant”, January 2016 *Matériaux & Techniques* 104(6-7):608 .
- [5] Holcim (Belgique) S.A, “Le Guide Pratique : concevoir et mettre en œuvre des bétons durables”, 2ème édition 2018 , Page8.
- [6] S.Ferreiroa M.M. C.Canutb J.Lunda D.Herforta, “Influence of fineness of raw clay and calcination temperature on the performance of calcined clay-limestone blended cements”.
- [7] OULED NAIMI Abdelmajid et RIGHI AMINA , “Effet des argiles calcinées sur les propriétés physico mécaniques des pâtes de ciment”, Université de Ghardaïa, mémoire de master, 2020/2021 .

## CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

### I.1 Introduction :

Une addition minérale pour béton est un matériau finement divisé, utilisé dans la formulation des bétons hydrauliques. Elle est incorporée dans le béton lors de sa fabrication pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières : compacité, durabilité, tenue à des environnements agressifs. Ces ajouts de ciment peuvent être des matériaux naturels, des déchets industriels, ou des sous-produits, parmi les ajouts cimentaires utilisés, on trouve les cendres volantes, la fumée de silice, les laitiers granulés de hauts fourneaux, etc....

Ce chapitre est une synthèse bibliographique des travaux de recherche, passe en revue les connaissances actuelles les plus pertinentes sur le rôle des additions dans les matériaux cimentaires pour élucider, en particulier, comment ils contribuent à l'activité liante du ciment et comment cet apport liant peut être pris en compte. On donne un aperçu en tant que substitutions dans les matériaux cimentaire.

### I.2. Généralité sur Ciment :

#### I.2.1. Historique du ciment :

Les ciments auraient en premier lieu été découverts par les Égyptiens puis perfectionnés par les civilisations suivantes, tels que les Mayas et les chinois, par l'utilisation de chaux obtenue par cuisson de roches calcaires, suivie d'une extinction à l'eau. Les Grecs d'Italie le renforcèrent avec des cendres pouzzolaniques (cendres volcaniques de la région de Pouzzoles), usage repris et généralisé par les Romains. Jusqu'à l'Époque moderne, le ciment est un liant, fréquemment une chaux, additionnée d'additions comme les tuiles ou briques concassées dont l'argile à des propriétés hydrauliques. La pouzzolane (terre volcanique de Pouzzoles, région de Naples, Italie) est particulièrement utilisée comme ajout [1].

La production de ciment sur le territoire français se fait en cimenteries et en stations de broyage. Ces dernières sont, à ce jour, au nombre de 31 en 2015, réparties en 5 sociétés : LafargeHolcim, Vicat, Egiom (filiale de Cement Roadstone Holdings – CRH), Ciments



Calcia (groupe Heidelberg Cement) et Kerneos, société spécialisée dans les ciments alumineux [2], et la découverte des principes d'hydraulicité des ciments lents (dits actuellement ciments Portland) toujours par Louis Vicat (société Vicat) - une cuisson à la température de fusion pâteuse soit 1450 °C qui permet d'obtenir le clinker - pour voir une réelle fabrication de ces ciments modernes et apparaître ensuite une architecture de béton coffré puis béton armé [3].

Les Ciments Portland sont des liants hydrauliques composés essentiellement de silicates de calcium hydrauliques, et aluminates qui font prise et durcissent en vertu d'une réaction chimique à l'eau nommée hydratation [4, 5].

### I.2.2. Matières premières :

Les matières premières utilisées pour fabriquer le ciment sont composées essentiellement de chaux (CaO), de silice (SiO<sub>2</sub>), d'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et d'oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), la chaux est apportée généralement par les roches carbonatées qui représentent 80 % du cru d'alimentation (Tableau I.1). L'alumine, la silice et l'oxyde de fer sont apportés par des argiles ou des schistes formant approximativement 20 % du cru d'alimentation [6, 7, 8].

Tableau I. 1 : Composition du cru. [6] [48]

Matière première	Formule chimique	Abréviation	Proportion	Source de matière première
chaux	CaO	C	77 à 80%	Argile, calcaires, calcite, craie, laitier, marbre, schiste, etc.
Silice	SiO <sub>2</sub>	S	10 à 15%	Argile, calcaires, basalte, silicate de calcium, laitier cendres quartzite, sable, schiste, etc.
Alumine	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	5 à 10%	Argile, bauxite, laitier cendre volante, minerai d'aluminium, schistes
Oxyde de fer	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	2 à 3%	Argile, minerai de fer, pyrite calcinée, schiste, etc

### I.2.3. Processus de fabrication du ciment :

Le procédé de fabrication du ciment consiste à broyer un mélange de matières premières (calcaire + argile) puis à les faire cuire dans un grand four rotatif à une température atteignant environ 1450°C. De la carrière aux silos de stockage du ciment, la matière passe par trois étapes principales (Figure I. 1) [9]:

1. Préparation du mélange des matières premières.
2. Clinkérisation (la fabrication du clinker).
3. Production du ciment (le broyage du clinker et l'élaboration du ciment).

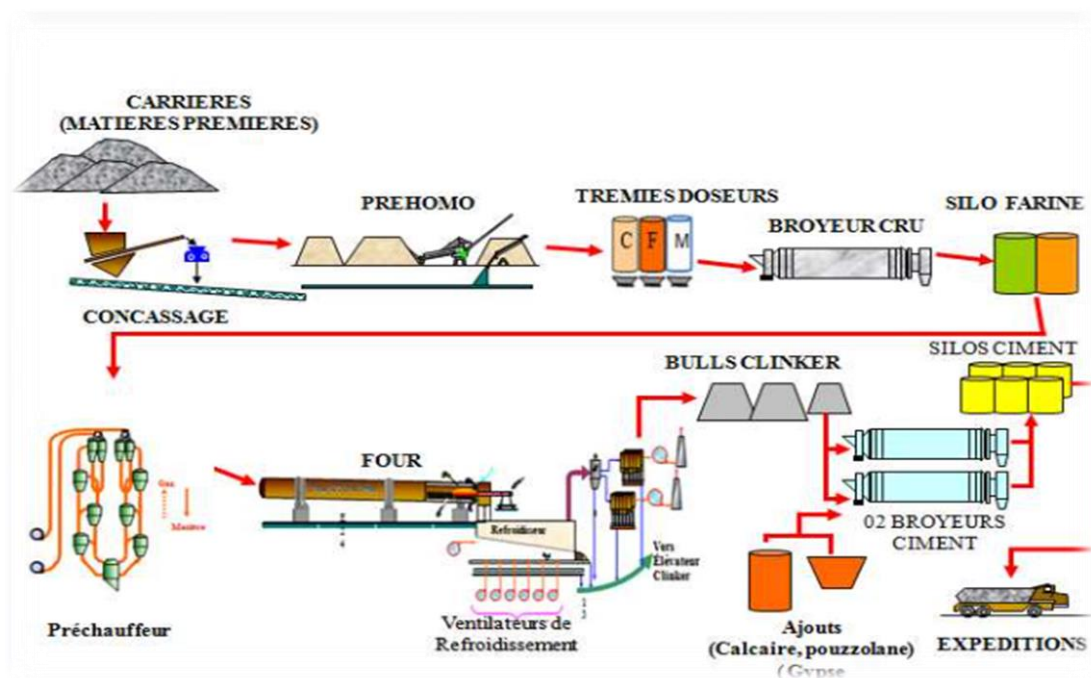


Figure I.1: Schéma de la fabrication du ciment [10].

#### I.2.3.1. Extraction et préparation des matières premières :

Les matières premières principales (calcaire et argile) sont extraites des carrières situées à proximité de la cimenterie par abattage à l'explosif. Les blocs roches obtenus sont transportés par des camions de 30 à 50 tonnes (Figure I. 2) et concassés en éléments de dimensions maximales de 50 mm dans l'atelier de concassage (c'est un concasseur à marteaux à deux rotors).



Figure I.2 : Extraction et préparation des matières premières. [6]

### I.2.3.2. Broyage cru :

Les matières premières pré homogénéisées doivent être finement broyées (Figure I. 3) pour être chimiquement plus réactives au cours de leur cuisson dans le four. Les réactions chimiques et les échanges thermiques sont en effet d'autant plus intenses que les surfaces des particules sont plus grandes. Les meilleurs clinkers sont obtenus à partir de la mouture plus fine. Le mélange du calcaire, d'argile de sable et de minerai de fer est dosé pour alimenter les deux broyeurs cru R1 et R2, le produit résultant du broyage est appelé farine crue, elle est stockée dans deux silos d'homogénéisation de 8000 tonnes chacun. [6]

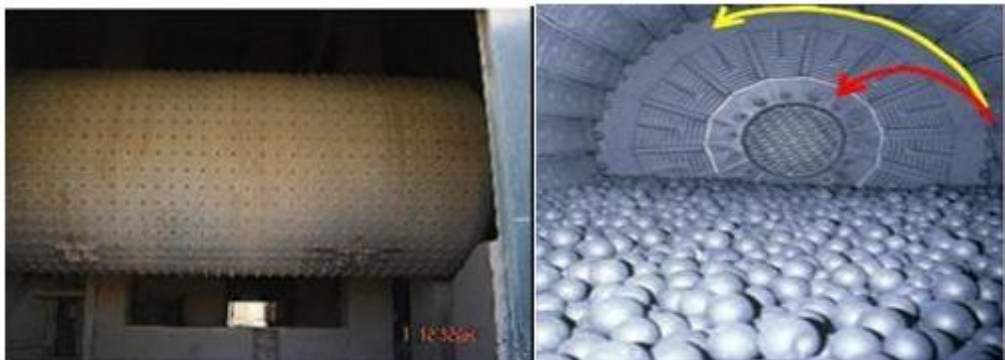


Figure I. 3 : Broyeur. [6]

### I.2.3.3. Cuisson de la farine et stockage de clinker :

Les installations de cuisson sont similaires et comportent deux parties : un échangeur de chaleur, comportant 4 à 5 cyclones dans lesquels la poudre déversée à la partie supérieure progresse jusqu'à l'entrée du four, qui se réchauffe au contact des gaz chauds sortant de ce four et se décarbonate en partie. La deuxième partie est la cuisson dans un four cylindrique

ayant 60 à 150 mètres de long et de 4 à 5 mètres de diamètre, légèrement incliné et tournant à environ 1 tour/mn (Figure I. 4) et (Figure I. 5). Le cru pénètre à l'amont du four où s'achève la décarbonatation et progresse jusqu'à la zone de clinkérisation (1450 °C). Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile (silicates d'alumine et d'oxyde de fer) se combinent avec la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et aluminates de chaux.



Figure I. 4 : Zone de cuisson. [6]

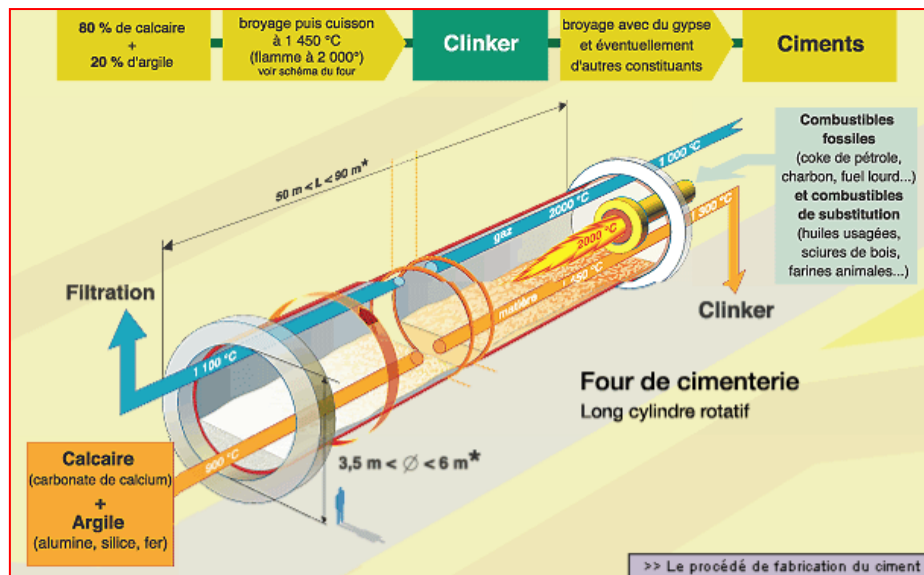


Figure I. 5 : Four rotatif. [11]

Tableau I. 2 : Caractéristiques du four rotatif. [11]

Production nominale du clinker	3000 T/j
Consommation calorifique garantie à production nominale	840Kcal
Longueur totale de la virole	90000mm
Diamètre intérieur de la virole	5700/5400mm
Diamètre utile de conique d'entrée	4000mm
Epaisseur de briquetage	225mm
Diamètre utile	5250/4950mm
Vitesse de rotation	0.82-1.97tr/min
Moteur principale	500Kw

La matière est refroidie brusquement de 1450 °C à environ 100 °C en quelques minutes de figer les espèces minérales qui seraient instables à la température ambiante : le silicate tricalcique se décompose en silicate bicalcique et en chaux (CaO). On obtient des granules de diamètre variant de 10 à 30 mm "le clinker".

#### I.2.3.4. Stockage, ensachage et expédition:

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac (Figure I. 6 et Figure I. 5). L'ensachage s'effectue dans des sacs en papier kraft de 50 kg à l'aide de machines capables de remplir de 2000 à 4000 sacs par heure.



Figure I. 6 : Expédition en sac. [6]



Figure I. 7 : Expédition en vrac.

**I.2.4. Classification des ciments en fonction de leur composition :**

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) le (Tableau I. 3 ) présente les caractéristiques de chaque phase [12].

Tableau I. 3 : Phases principales du ciment Portland et leurs caractéristiques [13].

Phases	C3S	C2S	C3A	C4AF
Formule chimique	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>10</sub>
Nom technique	Alite	Bélite	Phase aluminat	phase ferrite
Réactivité	Elevée	Faible	très élevée	Faible
Impuretés	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O, SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O, MgO	MgO, SiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub>
Contribution à la résistance	forte à jeune âge	forte à un âge très tard	forte à jeune âge	très faible

**I.3. Type de ciments :**

**CEM I:** Ciment portland (CPA - dans la notation française). Ciment Portland standard. Un ciment à usage général pour une variété d'applications de construction.

**CEM II:** Ciment portland composé (CPJ), Une modification du type I, qui résiste aux attaques au sulfate et à une diminution du taux de dégagement de chaleur. Application Béton exposé à une attaque modérée de sulfate Quand on souhaite moins de dégagement de chaleur que celui du TYPE 1.

**CEM III:** Ciment de haut fourneau (CHF). Un ciment à haute résistance précoce et à durcissement rapide. Application Obtention rapide d'un niveau de résistance donné.

**CEM IV:** Ciment pouzzolaniques (CPZ). Conçu pour une hydratation à basse température. Application quand on souhaite réduire la chaleur d'hydratation..

**CEM V:** Ciment au laitier et aux cendres (CLC). Conçu pour une résistance extrême aux sulfates. Application Béton exposé aux sulfates [14,15].

#### **I.4. Hydratation du ciment Portland :**

La pâte de ciment hydraté est le résultat de la réaction chimique entre l'eau et le ciment. C'est un processus chimique complexe où les principaux composés du ciment  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  et  $C_4AF$  réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui durcissent avec le temps [16, 17, 18, 19].

L'étude des mécanismes d'hydratation de chaque phase pure permet une première approche de la compréhension de l'hydratation du ciment Portland. (La Figure I. 8) présente schématiquement des constituants anhydres du clinker du ciment Portland et leurs produits d'hydratation, l'aire des cases donne le volume approximatif des phases.

##### **I.4.1. Hydratation du $C_3S$ et $C_2S$ :**

Les deux silicates s'hydratent immédiatement en présence de l'eau de gâchage selon les réactions chimiques suivantes ;

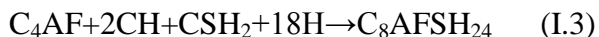


Les silicates de calciums hydratés (C-S-H) ; occupent entre 50% et 60% du volume solide d'une pâte de ciment complètement hydratée [20,21].

La chaux hydratée  $Ca(OH)$  (CH ou portlandite) ; elle occupe de 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée.

##### **I.4.2. Hydratation des $C_3A$ et $C_4AF$ :**

Une partie de CH obtenu des l'équation (1.1) et (1.2) réagit ensuite, avec les deux autres minéraux restants selon les réactions d'hydratation suivantes [21, 22] ;



Où le  $CSH_2$  est le gypse ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ).



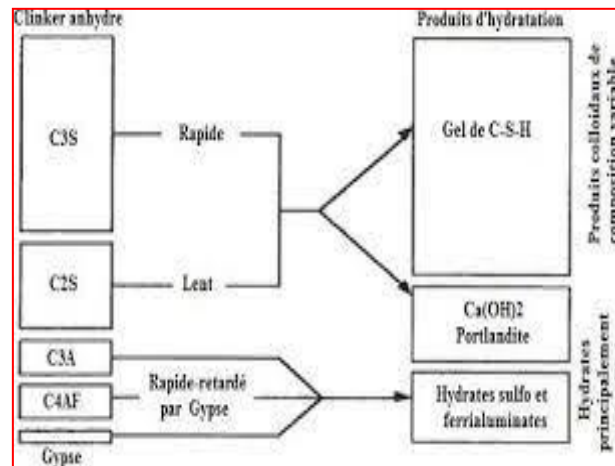


Figure I. 8 : Représentation schématiquement les constituants anhydres du clinker et des produits d’hydratation [22].

## I.5. Réactivité des autres constituants du ciment (les additions minérales) :

### I.5.1. La pouzzolane (Z) :

Les pouzzolanes, sont les matériaux possédant un caractère pouzzolaniques, Généralement, les pouzzolanes peuvent être subdivisées en matériaux naturels et artificiels (sous-produit) (Figure I.9).

Les premiers comme leur nom l’indique sont des roches naturelles et leurs traitements sont d’habitude limités au concassage, broyage, et tamisage. De tels matériaux incluent les cendres volcaniques et les dépôts de lave (par exemple les verres volcaniques et les tufs volcaniques) et sont connus, par conséquence, comme ‘les pouzzolanes naturelles’. Un autre type de pouzzolane naturelle est la terre à diatomées, c’est-à-dire une terre qui est principalement composée des squelettes siliceux de diatomées déposés de l’eau fraîche ou de mer [23, 24].



Figure I. 9 : Pouzzolane naturelle [23].



Cependant, quand ils sont traités thermiquement à des températures de 600-900°C, de tels matériaux deviennent pouzzolaniques et sont appelés ‘pouzzolanes calcinées’.

Les pouzzolanes calcinées sont en réalité des pouzzolanes artificielles, mais d'habitude ils sont groupés avec les pouzzolanes naturelles. Comme mentionné plus tôt, le deuxième groupe de pouzzolanes, sont des sous-produits de procédés industriels. Les matériaux les plus communs de ce groupe sont la cendre volante et la fumée de silice, et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques [23].

### I.5.2. Laitier granulé de haut-fourneau (S) :

Le laitier, (Figure I.10) sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 et 35 %, de l'alumine entre 12 et 30 % ainsi que de la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker.

Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le Portland et craint donc davantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de la chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique [26].

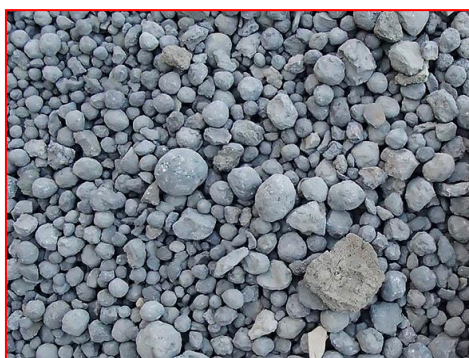


Figure I.10. Laitier granulé de haut-fourneau.

### I.5.3. Fumée de silice (D) :

Ces sous-produits proviennent de l'industrie du silicium métal et de ses alliages (en particulier du ferro-silicium) Figure I.11. De taille ultrafine (entre 0,01 et quelques micromètres), elles contiennent plus de 90 % de silice amorphe. Leur très grande finesse

provoque, dans le béton frais, une agglomération importante, qu'il importe de contrecarrer en utilisant des adjuvants de type super plastifiant. On restaure ainsi une partie de la finesse originelle des particules, qui ont alors la capacité de se placer dans les interstices des grains de ciment, diminuant la demande en eau du mélange (effet filler). Lors de l'hydratation, le processus pouzzolanique prend place, avec une intensité et un cinétique très supérieure à elle que l'on rencontre en présence de cendres volantes silico-alumineuses. Le niveau de performances atteint, et la nécessité de l'adjuvantation réservent en fait l'utilisation des fumées de silice à la formulation des bétons à hautes performances. Certains composés secondaires ont un effet négatif sur les propriétés des fumées de silice; ainsi, le carbone augmente leur demande en eau, alors que la teneur en alcalins réduit leur efficacité cimentière. [26].



Figure I.11. Fume de silice.

### I.5.4. Filler Calcaire :

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 (Figure I.12).

Leur composition chimique est celle du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). 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. Le filler calcaire utilisé est de type ALCAL F50, composé essentiellement de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  avec une teneur de 99 %, on s'intéressera uniquement aux fillers calcaires pouvant être produits en Algérie [26, 27]. Son utilisation comme addition au ciment Portland améliore certaines propriétés du béton frais et durci et permet aussi de réduire le coût de production et l'émission du  $\text{CO}_2$  [28].



Figure I.12. Filler calcaire.

#### **I.5.4.1. Rôle des Fillers calcaires :**

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires peuvent jouer plusieurs rôles:

Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).

Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.

Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C3S et du C<sub>3</sub>A.

Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat.

Une étude sur mortier, faisant varier finesse et taux de substitution de l'addition calcaire, a montré que les résistances mécaniques les plus élevées étaient obtenues avec des valeurs optimales de taux. [49]

#### **I.6. Argiles :**

Le terme : Argile, fait couramment allusion à tout matériel naturel constitué par un ensemble de minéraux de granulométrie très fine qui se caractérise par sa plasticité à l'état humide et par sa forte cohésion après séchage.



Figure I.13 Argile.

Les argiles sont définies en fonction de deux critères, l'un concernant la taille de grains et l'autre la minéralogie. Du point de vue de la granulométrie, les argiles comprennent la fraction de particules inférieure à 2  $\mu\text{m}$  ou 4  $\mu\text{m}$  selon le cas. Cette fraction est constituée par un assemblage de particules colloïdales très hétérogènes incluant divers minéraux, parmi lesquels les aluminosilicates hydratés sont prédominants. En plus faible proportion on trouve des cristaux finement divisés de quartz, feldspaths, carbonates, oxydes, hydroxydes et de la matière organique. Du point de vue minéralogique, les argiles sont des aluminosilicates hydratés appartenant, pour la plupart, à la famille des phyllosilicates [29].

### I.6.1. Les grandes familles de minéraux argileux :

L'épaisseur et les propriétés physiques des feuilletts permettent de distinguer les diverses familles d'argiles caractérisées par des propriétés différentes. On peut distinguer quatre grandes familles.

#### I.6.1.1. La kaolinite :

De formule de base :  $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , la plus pauvre en silice à deux couches ; dans le feuillet élémentaire, une couche de  $\text{Al}(\text{OH})_6$  octaédrique disposée au-dessus de chaque couche de  $\text{SiO}_4$  tétraédrique. Cela signifie que les kaolinites présentent une teneur élevée en alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) qui peut atteindre 35 à 38% dans le cas d'argile réfractaire de bonne qualité [30].

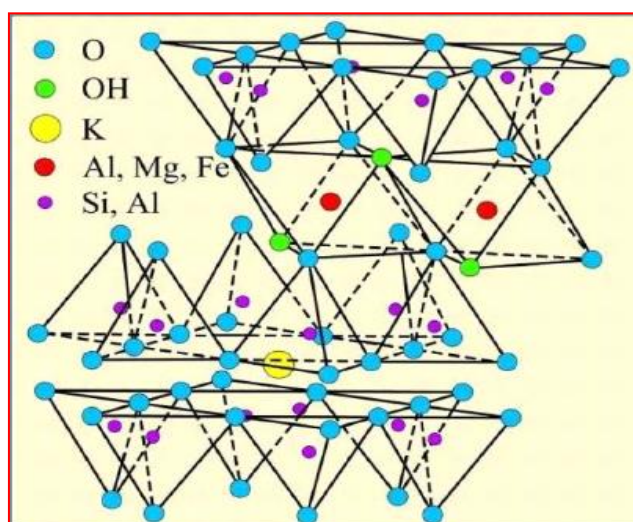


Figure I. 14 : Représentation schématique de la structure de kaolinite [31].

### I.6.1.2. Les montmorillonites :

Ce sont des phyllosilicates de formule de base :  $4\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , plus riche en silice que la kaolinite; l'adsorption d'eau et la fixation de cations sont donc très marquées. La montmorillonite fait partie des smictites, correspondant à un feuillet à 3 couches: tétraédrique-octaédrique- tétraédrique La capacité d'échange cationique (CEC) élevée varie de 100 à 130 meq/100g d'argile calcinée à 900°C. L'une des argiles la plus connue de cette famille est la terre décolorante, cette argile n'est jamais pure à l'état naturel mais accompagnée d'impuretés minérales (quartz, muscovite, calcite...), des minerais au moins 75% de cette argile porte l'appellation commerciale de bentonite [30].

### I.6.1.3. Les illites :

Les illites sont des silicates micacés à 3 couches; au-dessus et en dessous de chaque couche d'Al (OH) 6 octaédrique se trouve une couche de  $\text{SiO}_4$  tétraédrique. Ce groupe comprend plusieurs types d'argiles, également riche en silice, et ses propriétés sont intermédiaires entre celles des deux familles précédentes. Association d'une CO (alumineuse) et deux CT (siliceuses). Mais il peut y avoir des substitutions (remplacement de Si par Al). Des cations ( $\text{K}^+$ ) sont adsorbés dans l'espace interfoliaire afin de compenser le déséquilibre des charges. C'est le minéral ubiquiste par excellence. Sa structure est proche de la muscovite (plus d'eau, moins de  $\text{K}^+$ ) [30].

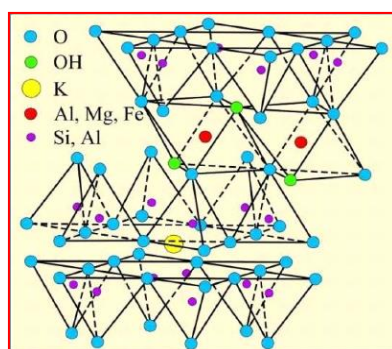


Figure I. 15 : Représentation schématique de la structure de l'illite [31]

### I.6.2. Classification des types et nomenclature des minéraux argileux :

La classification et la nomenclature des minéraux argileux reste délicates à cause de la difficulté de séparer des cristallites des corps étrangers associés aux argiles à l'état naturel, ainsi que l'ordre structural et le mode d'association des feuillets d'argile. Donc la classification des minéraux argileux restent délicats car les espèces microcristallines qui les

constituent sont sujettes à des variations de compositions dues aux nombreuses possibilités de substitution [33].

a) Les minéraux fibreux qui sont des espèces à pseudo feuillets, par exemple les palygorskites (attapulgite) et les sépiolites.

b) Les minéraux phylliteux à structures lamellaires. Ces derniers sont les plus répandus et les plus étudiés. Leur classification est basée sur le mode d'association des couches structurales et le degré d'occupation des sites de la couche octaédrique (di ou trioctaédrique). Selon la séquence d'empilement des couches tétraédriques et octaédriques, on distingue des minéraux de type : 1/1 (T-O) 2/1 (T-O-T) 2/1/1 (TO-T-O)[34,35].

### I.7. Activation des argiles :

L'activation est un procédé classique qui consiste à améliorer les propriétés d'adsorption de l'argile en lui faisant subir un traitement physique (thermique) ou chimique (échange ionique) :

#### I.7.1. Activation thermique :

L'activation thermique est un traitement de l'argile à la chaleur pouvant atteindre plusieurs centaines de degrés Celsius. Ce traitement est limité par la résistance du matériau aux élévations de températures qui pourrait détruire la structure de l'argile. Parfois le traitement thermique de l'argile préalablement imprégnée par l'acide est favorisé. Le traitement thermique provoque quelques modifications dans le matériau. Le départ de l'eau d'adsorption (eau inter foliaire) est presque total aux environs de 220 °C tandis que le départ de l'eau de constitution et des hydroxyles des octaèdres a lieu à des températures plus élevées entre 350 °C et 1000 °C [36].

#### I.7.2. Activation chimique aux acides :

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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO<sub>3</sub>. Les composés du Mg partent plus facilement que ceux de Fe et Al. En fait, l'activation chimique de la montmorillonite est largement étudiée. Au cours du traitement :



- Les cations qui se trouvent dans l'espace inter foliaire 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 [37].

### **I.8. Domaines d'application des argiles :**

L'argile est considérée comme une matière essentielle utilisée par l'homme par rapport à ses nombreux domaines d'applications, comme dans l'industrie pétrolière, le gonflement de l'argile au contact d'une eau salée présente dans les fluides de forage peut conduire à la formation de bouchon ce qui rend la récupération du pétrole difficile. Outre leur utilisation pour le stockage des déchets nucléaires en formation géologique profonde [38].

Application des argiles A cause de les diverses propriétés physico-chimiques (adsorption et absorption de divers ions et molécules, adhésion, émulsion, malléabilité, résistance, ...), les argiles ont été utilisées depuis la plus haute antiquité et déjà par nos ancêtres de la préhistoire pour la fabrication des poteries rudimentaires. De nos jours, l'utilisation des argiles connaît un nouvel essor notamment dans l'industrie :

-Pétrolière pour la fabrication des boues de forage [39].

-Bâtiment : pour la fabrication des briques (maisons, hauts fourneaux, fours d'affinage et de laboratoires, ...), des tuiles, des carreaux de grès cérames, ...

### **I.9. Argiles calcinées :**

La calcination des argiles consiste à les mettre sous l'effet des hautes températures (400 à 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, la transformation du Quartz  $\alpha$  en Quartz  $\beta$ , 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<sub>2</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, deviennent réactifs et peuvent réagir avec la chaux dans une réaction qu'on nomme réaction pouzzolanique [40,41].

### I.9.1. Mode d'obtention :

Les pouzzolanes sont classées en deux groupes : naturelles et artificielles. Les pouzzolanes naturelles proviennent surtout des roches volcaniques et la pouzzolane artificielle est la calcination, dont l'analyse thermique différentielle (ATD) est le moyen adéquat pour suivre l'évolution des transformations au cours de la calcination, et qui met en évidence trois phénomènes: La déshydrations, dés hydroxylation, La recristallisation acquièrent des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques lorsqu'ils sont activés thermiquement. C'est notamment le cas des schistes houillers brûlés dans les chaudières à une température d'environ 800°C [41, 42].

### I.10. Influence de la température de cure :

#### I.10.1. Chaleur d hydratation :

L'évolution de la température dans le béton ou mortier est liée aux réactions d'hydratations exothermiques et à l'apport de chaleur. Elle peut être schématisée en 4 périodes (Figure I. 16 ) un prétraitement, une période de montée en température, un palier de température puis une période de descente en température. En fonction du type et de la dimension de la pièce, chaque période varie en termes de durée et de température conduisant à des vitesses de montée ou de descente en température variables [43].

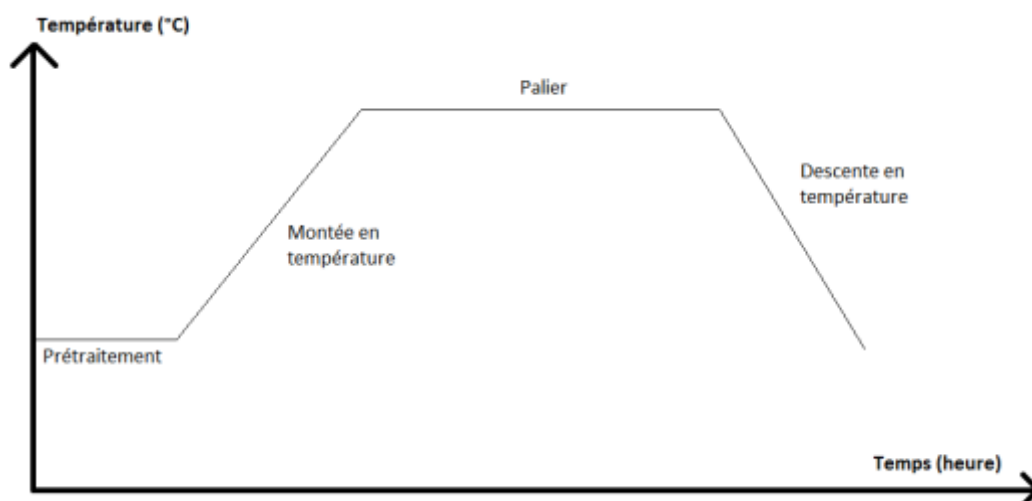


Figure I. 16 : Schéma d'un cycle de traitement thermique [43].

En effet dès que l'on veut pratiquer un cycle de durcissement court à température élevée (supérieure à 40 °C) les écarts de températures entre les faces chauffées et le cœur dépassent



souvent les valeurs admissibles (20 °C). Cela impose alors de respecter des gradients limités pour la montée en température (par exemple 20 °C. Cela impose alors de respecter des gradients limités pour la montée en température.

La température conduit à une accélération de la vitesse d'hydratation du ciment, conduisant à un plus grand avancement réactionnel à court terme et donc à des performances mécaniques du béton plus élevées à court terme. De plus, dès que la température appliquée au béton ou mortier est supérieure à la température ambiante, il est important de ne pas négliger les moyens de protection contre la dessiccation (génératrice de problèmes microstructures, fissuration et perte de durabilité) ainsi que les déperditions pouvant générer un gradient de température entre le centre et l'extérieur du béton ou mortier.

### **I.10.2. Influence la vitesse des réactions :**

La température influence directement la vitesse des réactions chimiques. Une réduction de la température diminue la cinétique d'hydratation alors qu'une température élevée accélère la vitesse d'hydratation

L'influence de la température sur la cinétique d'hydratation est traduite par la loi d'Arrhenius (Équation I.5) dans plusieurs études.

$$d \ln k / dT = E / RT^2 \quad \text{avec :}$$

k : un coefficient de vitesse ;

T [K] la température ;

R [J.K<sup>-1</sup> .mol<sup>-1</sup>] la constante des gaz parfaits et

E [J. mol<sup>-1</sup>] l'énergie d'activation d'Arrhenius.

La **Figure I.17** sont représentés le degré d'hydratation et la résistance à la compression en fonction de trois températures de cure isotherme à 5, 20 et 30 °C. Notons que sur la **Figure I.17**, le degré d'hydratation final est le même pour les trois conditions de température. Au niveau des résistances mécaniques, une température élevée va accélérer la prise mais réduire la résistance à long terme [44, 45].

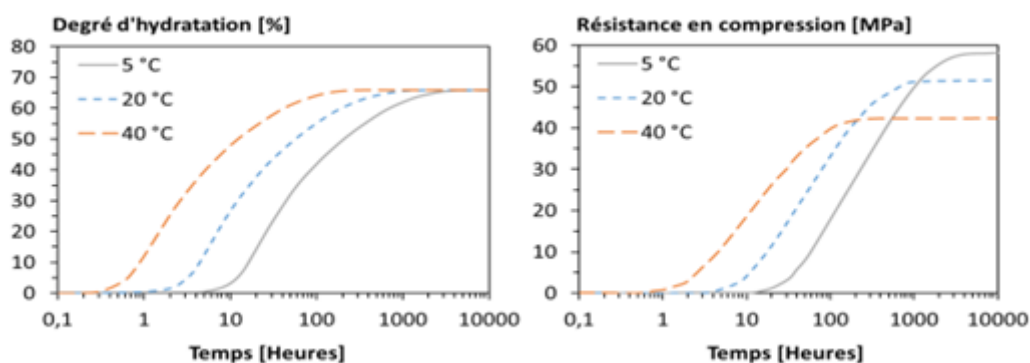


Figure I. 17 : Influence de la température sur l'hydratation et les résistances en compression au cours du temps [45].

La nature chimique et la stabilité des hydrates, ainsi que la microstructure des matériaux cimentaires sont fortement modifiées par la température. Entre 5 et 30 °C, Lothenbach [46] a montré qu'il y a une très faible différence entre les produits d'hydratation.

À température plus élevée, les études de Kjellsen [47] ont permis d'observer que la morphologie de la Portlandite dépendait fortement de la température. En effet, à 20 °C, la Portlandite apparaît sous forme de plaquette, tandis qu'à 50°C la Portlandite ressemble plus à des amas très denses.

L'hydratation à température élevée peut conduire à une précipitation plus dense et plus rapide d'hydrates. Cela est particulièrement le cas pour les C-S-H qui se forment à l'extérieur du grain de ciment. Ce phénomène a pour conséquence un remplissage de la porosité capillaire moins efficace. Il y a donc une cinétique d'hydratation plus importante qui entraîne une résistance du matériau cimentaire plus élevée au jeune âge. Cependant, à long terme, le degré l'hydratation est plus faible en raison d'une formation plus dense des hydrates qui réduit l'avancement de l'hydratation (Figure I.17). La température de conservation joue un rôle important sur les cinétiques d'hydratation du matériau cimentaire. C'est l'une des raisons pour lesquelles ces travaux de thèse ont été orientés vers l'influence de la température de conservation sur l'hydratation de matériaux cimentaire à base de fines recyclées [44].

### **I.11. Conclusion :**

Il n'est pas facile de déterminer des règles générales pour l'utilisation de combinaisons de ciment, de mortiers ou d'additifs pour béton. Cela vient des objectifs des scientifiques dont les travaux visent à caractériser ou rechercher des différences de propriétés spécifiques, à partir d'un grand nombre de paramètres de composition, de matériaux locaux, de méthodes d'installation et d'essais. C'est ce que l'on voit dans la recherche bibliographique, et cela a plusieurs importants :

Il montre généralement la spécificité de l'incorporation d'additifs dans la matrice cimentaire. Il peut déterminer l'effet des additifs sur les propriétés du mortier. La formulation de matériaux durables reste actuellement l'une des principales difficultés de leur développement et de leur utilisation.

On peut conclure que les charges de bentonite et de calcaire ont des propriétés particulières qui peuvent être utilisées dans plusieurs domaines d'application et dans l'industrie de la construction pour améliorer les propriétés rhéologiques et structurelles des produits cimentaires en général et du béton en particulier. Compte tenu de la tendance générale à l'utilisation de produits à haute qualité environnementale, la bentonite peut être valorisée et utilisée comme matériau de construction en respectant au maximum les ressources naturelles et l'environnement.

L'étude des paramètres extrinsèques de ces nouveaux matériaux permettra également de déterminer l'effet du couplage thermique-hydrique sur l'hydratation des matériaux cimentaires.

Il est donc nécessaire de réaliser un travail de recherche en laboratoire, couvrant tous ces aspects, en tenant compte de l'influence de la température, de l'influence du sable et du type de ciment et des Caractéristique les ajouts.

### I.12. Référence :

[1] Mohammed Rafiq KADRI, Soumia ROUIGUEB. Hadjer Abir CHIKH, " Contribution à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et de la consommation énergétique dans l'industrie cimentaire par l'amélioration d'un système de production : Cas de la cimenterie de Béni-Saf ", Mémoire de Master, Université Abou bekr Belkaid – Tlemcen, Page 23/24, 2016/2017.

[2] Antoine Faure, " Capacité d'un sédiment à se substituer à la fraction argileuse de la matière première de l'industrie des liants hydrauliques ", thèse de doctorat, Université de Limoges, Français, Page 26, 2017. HAL Id: tel-02428648.

[3] Avenier Cédric. " Entre pierre et béton, les ciments moulés dans l'architecture du XIX<sup>e</sup> siècle ". In: Tradition et innovation en histoire de l'art. Actes du 131-1<sup>e</sup> Congrès national des sociétés historiques et scientifiques, « Tradition et innovation », Grenoble, 2006. Paris : Editions du CTHS, pp. 86, 2009.

[4] Othmane Bouchenafa, " Mécanosynthèse et matériaux de construction : optimisation et application pour la clinkérisation et la géopolymérisation ", Thèse de Doctorat de l'Université Paris-Est, page 34, HAL Id: tel-02949614, 25 Sep 2020.

[5] Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, MacLeod et McGrath, " Dosage et contrôle des mélanges de béton ", 7<sup>e</sup> édition, page 22, 2004.

[6] HABOUL Samia, " Etude de l'influence du gypse et de la pouzzolane sur les propriétés du ciment ", Rapport de soutenance de Licence professionnalisant, Université Akli Mohand Oulhadj BOUIRA, Page 6/10, 2017 / 2018.

[7] BECKER (Marie) BOTELHO VALENTE (Fabien), développement durable et « green cement » (sustainable development and « green cement »), étude bibliographique, école des mines douai, promotion 2013 année scolaire 2009-2010..

[8] HFW Taylor and Thomas, " CEMENT CHEMISTRY ", 1997, page 1.

[9] Catherine E Housecroft, Alan G Sharpe, " Chimie inorganique ", chapitre 14, page 414, 2010.

[10] Cyril Guérande, " Etude de la qualité du piégeage des matières organiques par la matrice cimentaire vis-à-vis de la lixiviation ", Thèse de Doctorat en Chimie analytique, l'Université Paul Verlaine – Metz, 23 Novembre 2009.

- [11] Fatma Zohra, ‘‘ L’influence de la surface spécifique du Blaine sur le ciment’’, diplôme de Licence, DAHOU Université Akli Mohand Oulhadj Institut de technologie BOUIRA, Page14, 2017 /2018.
- [12] OULD MOUSSA Mourad Tadj eddine, ‘‘ Influence des ajouts pouzzolanique sur le comportement thermo-physiques des mortiers’’, MEMOIRE DE master Domain Efficacité Energétique des Bâtiments, Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem ,2020 .
- [13] Derouich hajar, ‘‘Réactivité de deux variétés cristallines de la phase aluminate tricalcique C3A du ciment en présence ou non de superplastifiant’’, université henri poincaré master génie civil , 2010/2011 .
- [14] Jean-Paul KURTZ, ‘‘Nouveau Dictionnaire du Génie Civil: Tome 2’’, Page126
- [15] Omar Chaallal, Structures en béton armé: calcul selon la norme ACNOR A23.3-04’’, Université du Québec. École de technologie supérieure, PUQ, 2012, page3.
- [16] Boubaker OUAREKH, Recherche bibliographiques sur l'effet de la carbonatation sur la durabilité des bétons, Mémoire de Master Travaux publics, Université Mohamed khider – Biskra, 2018.
- [17] JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE, MINISTERE DE L’HABITAT ET DE L’URBANISME N°40 , page18, 2juillet 2003.
- [18] NORME ALGERIENNE NA442, ‘‘ciments-Définition, classification et spécifications des ciments’’, éditées par institut algérien de la normalisation, Algérie, 2000
- [19] Ahmed HADJ SADOK , ‘‘durabilite des mortiers a base de ciment au calcaire’’, memoire de magister, constructions civiles et industrielles, université de Saad Dahled de blida, p17/18/19, juin 2004.
- [20] RAHMOUNI ZINE EL ABIDINE. MELLE TEBBAL NADIA,’’ Caracterisation d’un ciment a base de pouzzolane ‘‘, université Mohamed Boudiaf –M’sila, Page16, 2015/2016.
- [21] P. Barnes, J. Bensted CRC Press, ’’ Structure and Performance of Cements’’, Second Edition, /11/01 Page 89, 2002.
- [22] Double D.D. ‘‘New development in understanding the chemistry of cement hydration’’, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, volume 310, p. 54, 29 November 1983.

- [23] BANNI Razika, ‘‘ Effet des ajouts minéraux actifs et adjuvant fluidifiant sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons et leurs méthodes de formulation de mélange’’, Mémoire de Magister GÉNIE CIVIL, 2011
- [24] MABROUK Amira, ‘‘Valorisation des sous-produits locaux dans l’industrie du ciment portland’’, Mémoire de master, Université Mohamed Khaider Biskra, 2015
- [25] Guide pratique/ Holcim (Belgique) S.A, ‘‘concevoir et mettre en œuvre des bétons durables ‘’, 2eme édition, Page 8, 2018.
- [26] Georges DREUX/ jean FESTA, Béton ‘‘Nouveau guide du béton et de ses constituants ‘’, huitième édition 1998 troisième tirage page27/ 28, 2007,
- [27] R Dupain R.Lanchon J.C SAINT Arroman , GRANULATS SOLS CIMENTS ET BETON ‘‘caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire ‘’, Page 81
- [28] Belkacem MENADI, performance du mortier et béton a base de filler calcaire, universite saad dahlab de blida, thèse de doctorat d’état en génie civil, juil. 2008
- [29] Labri Fatima, contribution a la des eaux résiduaires textiles par des argiles naturelles, mémoire de magister, Université d’Oran, page29 , 10juin 2008.
- [30] Messaoud Hasnia, Effet de la température sur la qualité de la bentonite et caractérisation physico-chimique par FTIR au niveau de la société BENTAL - unité de Mostaganem, mémoire de master de chimie, université Abdelhamid ibn badis Mostaganem, page16,23/06/2014.
- [31] Abdelhadi EL HACHMI, argile et minéraux argileux : propriétés physico-chimiques et propriétés colloïdes, master chimie, université abdelmalek essaadi, 2013.
- [32] Amel zahira bouyakoUB, caracterisations de la bentonite intercalee au chrome(iii) et au cuivre(ii). Application au traitement des eaux usees de l'oued mekerra, memoire de magister, l'universite abou-bekr belkaid de tlemcen, 2001/2002.
- [33] CHARGUI FOUZIA, ‘‘synthese et caractérisation d’une mullite a base de matières locales pour substrats de silicium photovoltaïque’’, thèse de doctorat en sciences, université ferhat abbas-setif 1 ufas1 (Algérie), page 5, 2018 .

- [34] BELLIL Soumia, Etude de l'effet du mélange bentonite-ciment sur le potentiel d'affaissement des sols, Thèse Doctorat 3ème Cycle LMD, Géotechnique, Université Batna 2, 2019 .
- [35] BAKHTAOUI NAIMA, Synthèse, « caractérisations des composites à base d'argile et application à l'environnement », MEMOIRE, de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Mohamed Boudiaf, p9, 2014/2015.
- [36] Djaroum Aziza et al, photo-dégradation catalytique d'un produit pharmaceutique, mémoire de master, université de Mostaganem, 2020.
- [37] Belamri Ines et Hioul Sara, synthèse de molécules pharmaceutique par catalyse hétérogène en présence de la montmorillonite traitée, mémoire de master, université de Jijel, 2019.
- [38] M. DENDANE. Monsieur A. DJADOUN. « Etude des argiles de la région de TIZI-OUZOU par la méthode de diffraction aux rayons X », Mémoire de projet de fin d'études en Géologie Générale. , Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015/2016.
- [39] Anzan Koffi Abinan Arsene, « caractérisation physico-chimique de quelques matériaux argileux de Cote D'Ivoire-union -discipline-travail » I, mémoire de master, université de Nangui Abrogoua, 2017.
- [40] KERROUZI ISMAIL. SOUFARI ABDELWAHAB, " étude de l'influence de l'ajout de la pouzzolane sur les caractéristique physico-chimique des ciments", univ d'oran mohamed boudiaf, mémoire de fin d'étude de licence,
- [41] FURLAN, V. et HOUST, Y, " Les matériaux pouzzolaniques et leur utilisation", Chantiers, 7/80, p29-32, 1980.
- [42] BOULIFA Marwa et DEBABI Adel, Utilisation de poudre de verre dans le mortier, Mémoire MASTER, UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA, 2016/2017
- [43] Guide technique « Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne » ; IFSTTAR, 2017.
- [44] C.C. Castellano, V.L. Bonavetti, H.A. Donza, E.F. Irassar, The effect of w/b and temperature on the hydration and strength of blastfurnace slag cements. Construction and Building Materials, 111, pp.679–688 (2016)

[45] M. Cervera, R. Faria, J. Oliver, T. Prato, Numerical modelling of concrete curing, regarding hydration and temperature phenomena. *Computers and Structures*, 80, pp.1511–1521 (2002) .

[46] B. Lothenbach, F. Winnefeld, C. Alder, E. Wieland, P. Lunk, Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 37, pp.483–491 (2007).

[47] K.O. Kjellsen, R.J. Detwiler, O.E. Gjorv, Development of microstructures in plain cement pastes hydrated at different temperatures. *Cement and Concrete Research*, 21, pp.179–189 (1991).

[48] 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.277p,1989 .

[49] NAOUM Mohamed amine & SAYEH BEN AISSA Khaled, ‘’ Effets du filler calcaire sur la durabilité de mortier auto-plaçant exposé aux attaques chimiques’’ , Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, page17 2021.



## CHAPITRE II : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

### II.1. Introduction :

La présente partie a pour objet d'exposer la méthodologie suivie et l'approche que nous avons utilisée pour mener notre expérimentation afin d'atteindre les objectifs fixés pour la réalisation de cette étude. Dans ce chapitre, nous présentons les différentes méthodes d'essais utilisés ainsi que leurs modes opératoires et les références de leurs normes correspondantes, les matériaux utilisés et leurs caractéristiques en fin, l'identification et le mode de préparation des échantillons testés. En outre, un aperçu sur les essais expérimentaux ainsi que la réalisation de différentes études au cours de nos travaux.

### II.2. Caractérisation des matériaux utilisés :

Nous allons introduire les propriétés des matériaux utilisés comme suit :

#### II.2.1. Ciment :

Le ciment utilisé dans cette étude est le CPA il provient de la cimenterie de nommé MOKAOUEM\_(Figure II.1) CEM1 de classe 42.5 N-SR3, conforme a la norme algérienne (NA 442) [1] équivalents aux normes européenne (EN197-1) [2]. La composition chimique et les propriétés physico-mécaniques du ciment sont présentées dans le (Tableau II. 1 ).



Figure II. 1: Sac de ciment CEM I / A 42,5.

Tableau II. 1 : composition chimique et propriétés physiques du ciment.

<b>Composition Chimique</b>	<b>Elément</b>	<b>(%)</b>
	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>20.14</b>
	<b>CaO</b>	<b>63.47</b>
	<b>MgO</b>	<b>2.12</b>
	<b>AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>3.71</b>
	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>4.74</b>
	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>2.67</b>
	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>0.47</b>
	<b>T<sub>i</sub> O<sub>2</sub></b>	<b>0.21</b>
	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>0.69</b>
	<b>P<sub>2</sub>O</b>	<b>0.06</b>
	<b>Perte au feu</b>	<b>1.72</b>
<b>Propriétés Physiques</b>	<b>Densité spécifique</b>	<b>3.1</b>
	<b>Finesse (cm<sup>2</sup>/g)</b>	<b>3300</b>

### II.2.2. Sable :

Le sable d'Oued M'Zi (Région de Laghouat) est un sable alluvionnaire siliceuse car il est constitué majoritairement du Quartz (SiO<sub>2</sub>), il est caractérisé par des particules de forme roulée et de surface lisse.



Figure II. 2 : Sable d'Oued M'Zi

**II.2.2.1. Equivalent de sable :**

**Il est défini par la norme NFP 18-598 [3]/ NF EN933-8 [4] Modes opération :**

La propreté du sable peut être appréciée par l'essai d'équivalent du sable qui suit les étapes suivantes :

Remplir l'éprouvette avec la solution lavante jusqu'au trait inférieur, Introduire dans l'éprouvette une masse de sable sèche 120g de matériau à l'aide de l'entonnoir, Frapper fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main par déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon, Laisser reposer 10min, Boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc, Fixer l'éprouvette sur la machine d'agitation, Faire subir à l'éprouvette 90 cycles cycle en 30s, Remettre l'éprouvette en position verticale sur la table d'essais, Oter le bouchon de caoutchouc et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavante et Remplir en eau jusqu'au trait supérieur, Laisser reposer sans perturbation pendant 20 min .Au bout de 20 min ,Mesurer à l'aide du réglet la hauteur  $h_1$  au niveau supérieur du floculat par rapport au fond de l'éprouvette et Descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, faire venir buter le zéro contre la face inférieure de la tête du piston. Lire la hauteur du sédiment  $h_2$  au niveau de la face supérieure du manchon.

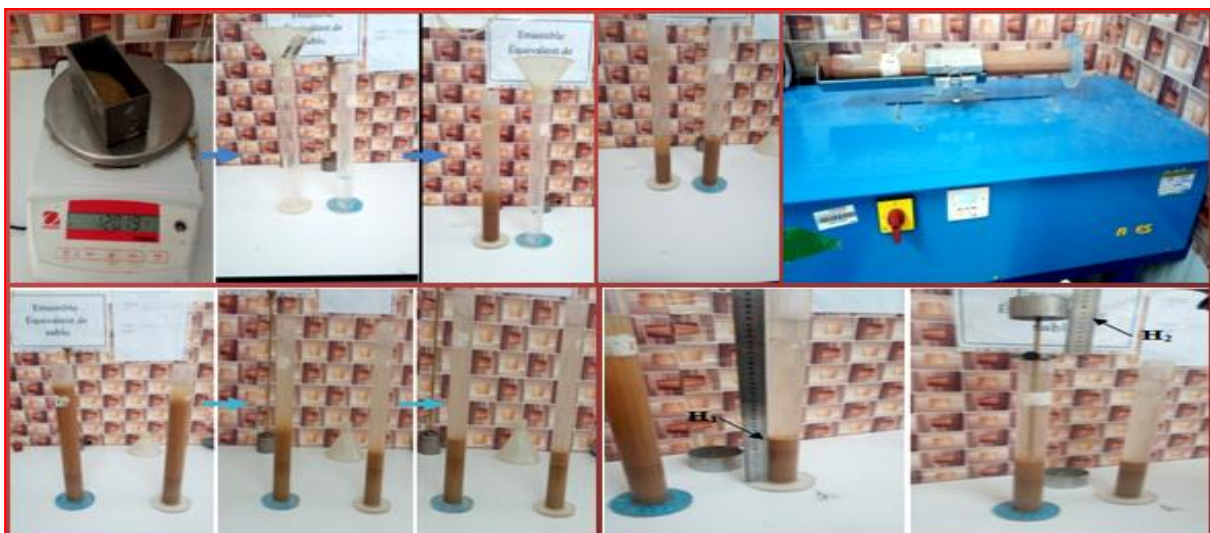


Figure II. 3 : Résultat de l'essai de l'équivalente de sable.

L'équivalent de sable d'une prise d'essai d'un échantillon est par définition mesuré au piston et donné par la formule :

$$ES = \frac{H2}{H1} * 100$$

Tableau II. 2 : Résultat de l'essai de l'équivalente de sable.

	Hauteur totale H 1cm	Hauteur sable H 2 cm	ES=% $\frac{H2}{H1} * 100$	ES moyen %	Observation
Essai 1	12.1	8.3	69.16	69.345	69
Essai 2	12.8	8.9	69.53		

Tableau II. 3 : Comparaison des résultats. [5]

E.S.V	E.S.P	Nature et qualité du sable
ES<65	ES<60	Sable argileux : Risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
65<ES<75	65<ES<70	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75≤ES≤85	70≤ES≤80	Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de hautes qualité.
ES≥85	ES>80	Sable très propre : L'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

**Pour le sable d Laghouat :** Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.

### II.2.2.2. Teneur d'eaux :

Il est défini par la norme NF EN1097-5 [6]

#### Mode opératoire :

Peser 1675 g de sable, puis placé dans une étuve (environ 24 h). Une fois la dessiccation réalisée, l'échantillon est pesé à nouveau après la sortie de l'étuve 1648 g. Les deux pesées donnent par différence la masse d'eau évaporée.



Figure II. 4 : sable d'essai Teneur d'eaux.

En déduire la teneur en eau  $w\%$  de l'échantillon par la relation

$$W(\%) = \left(\frac{w_w}{w_s}\right) * 100 = \left(\frac{1648}{1675}\right) * 100 = 98.38$$

$W(\%)$  : teneur en eau (exprimé en %)

$W_w$  : poids d'eau.

$W_s$ : poids de matériau sec.

### II.2.2.3. Analyses granulométrie :

Sont réalisées selon la norme NF EN 933-1[7] / NF P 18-560[8]

#### Modes opérations :

Dans cette essai, est pesé 2kg de sable sec est pesé, puis un groupe de tamis est préparé (4. 3,15. 2,5. 2. 1,6.1.0,8 .0,63.0;4 .0,2. 0,125. 0,080) et le sable est tamisé selon la séquence des tamis, puis est pesé le refus cumulé du tamis. Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulé Les résultats présentés dans le Tableau **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.** 4.



Figure II. 5 : Analyses granulométrie.

Tableau II. 4 : Analyse granulométrique de sable Laghouat.

Ouverture tamis	Refus partiel	Refus cumulé	Pourcentage refus	Pourcentage passant	observations
5	0	0	0	100	100
4	13.8	13.8	0.69	99.31	99
3.15	13	26.8	1.34	98.66	99
2.5	15.5	42.3	2.115	97.885	98
2	19.2	61.5	3.075	96.925	97
1.6	17.3	78.8	3.94	96.06	96
1.25	/	/	/	/	/
1	64.3	143.1	7.155	92.845	93
0.8	53.7	196.8	9.84	90.16	90
0.63	70	266.8	13.34	86.66	87
0.5	/	/	/	/	/
0.4	379.5	646.3	47.315	32.315	32
0.315	/	/	/	/	/
0.250	/	/	/	/	/
0.2	993.3	1639.6	81.98	18.02	18
0.16	/	/	/	/	/
0.125	137.7	1777.3	88.865	11.135	11
0.1	/	/	/	/	/
0.08	64.5	1841.8	92.09	7.91	8

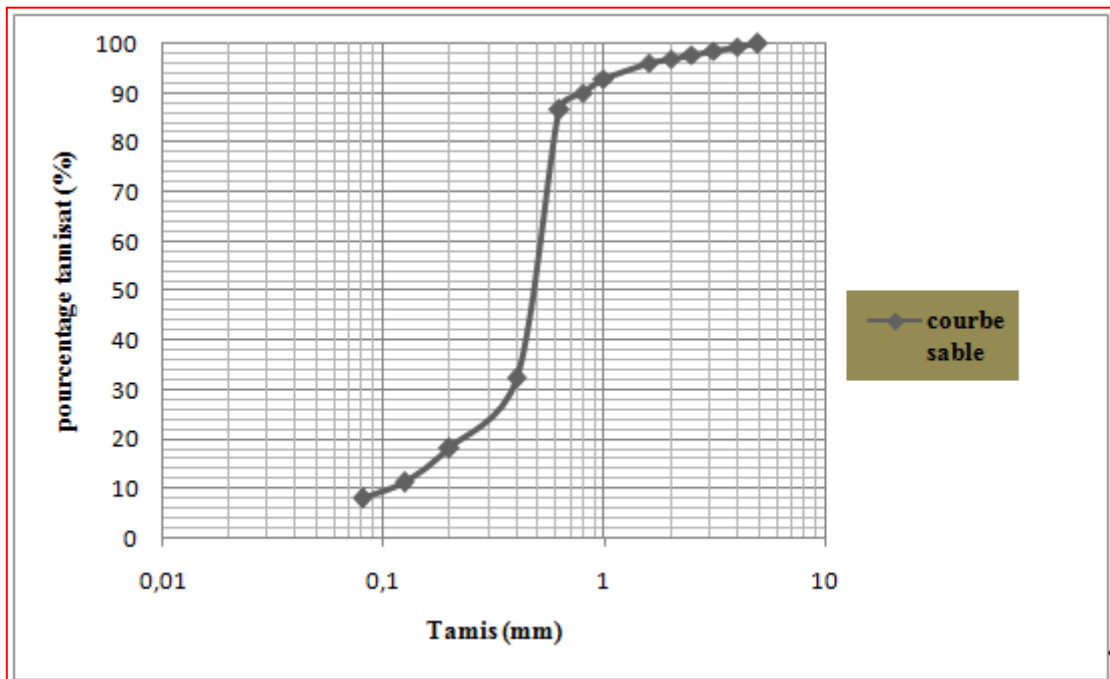


Figure II. 6 : Courbe granulométrique (sable de Laghouat ).

**II.2.2.4. Module de finesse :**

C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable, il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis de mailles :

[0,16-0,315-0,63-1,25-2,5 et 5 (mm)] sur 100 et calculé par la relation suivante :

$$M_f = \sum \frac{R_c}{100} \quad ; \quad R_c : \text{Refus cumulé.}$$

$$M_f = \frac{2.115 + 13.34}{100} = 0.15$$

Lorsque MF est comprise entre :

- Très fin : < 1.80
- Un peu trop fin : 1.80 à 2.20
- Préférentiel : 2.2 à 2.80
- Un peu trop grossier : 2.80 à 3.20

Module de finesse sable Laghouat : ( $M_f$ )=0.15.....sable très fin

**II.2.2.5. Masse volumique apparente :**

Cet essai est régi par la norme NFP 18-554 [9]

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

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :  $\rho = \frac{M}{V_r}$



Figure II. 7 : récipient rempli par le sable.

Tableau II. 5 : Masse volumique apparente du sable de Laghouat .

N° d'essai	M (g)	$\rho_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> ) moyen
01	2855	1.427	1.443
02	2883	1.442	
03	2923	1.462	

La masse volumique apparent Pour le sable de Laghouat est: 1,443 g / cm<sup>3</sup>

**II.2.3. Eau :**

L'eau qui a été utilisée pour le gâchage est une eau potable sans aucun traitement supplémentaire. Le pH mesuré régulièrement est voisin de 7.





Figure II. 8 : L'eau distillé .

#### II.2.4. Bentonite :

La bentonite utilisée au cours de notre travail est une argile naturelle (bentonite de Maghnia), Elle nous a été fournie dans des sacs .Nous avons utilisé de bentonite calcinée à 750 °C. La bentonite a été préparée selon les étapes suivantes :

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



Figure II. 9 : Bentonite après le séchage.

La bentonite a subi un processus de broyage mécanique à l'aide d'un appareil appelé micro-Deval

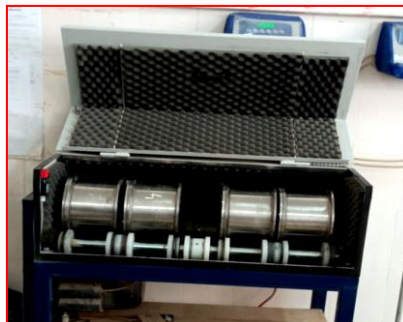


Figure II. 10 : Micro-Deval.

La méthode de broyage de la bentonite est la suivante : On a pesé 500 grammes de bentonite et 5 kilogrammes de boulets sphériques en acier inoxydable, en suit : Nous plaçons chacune de la bentonite et de boules sphériques a l'intérieur du cylindre creux de l'appareil micro-Deval de manière à mettre des poids approximativement égaux dans les 04 cylindres (Figure II. 11).



Figure II. 11 : la bentonite et de boules sphériques à l'intérieur du cylindre.

Remplacer le couvercle et ferme les boulons de fixation

Mise en place les quatre cylindres dans la machine : Faire fonctionner la machine de sorte qu'elle effectue 12000 rotation a une vitesse normale en deux heures, le dispositif permet au moteur de s'arrêter automatiquement, Nous séparons la bentonite des bille a l'aide d'un tamis (tami 0.4mm).



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

- La calcination de la bentonite se fait dans un four à moufle dans une température de 750°C avec une vitesse de 5°C par minute (environ deux heures et demie).



Figure II. 13 : Four à moufle.

### II.2.5. Filler calcaire :

Dans tous nos mélanges d'étude, nous avons utilisé un filler calcaire de l'usine de Ben Hammouda a Metlili / de Ghardaïa, La Filler calcaires a été préparée selon les étapes suivantes (même étapes de préparation de bentonite) :

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



Figure II. 14 : filler calcaires après le séchage.

La Filler calcaires a subi un processus de broyage mécanique à l'aide d'un appareil appelé micro-Deval

La méthode de broyage de Filler calcaires est la suivante : On a pesé 500 grammes Filler calcaires et 5 kilogrammes de boulets sphériques en acier inoxydable, en suit : Nous plaçons chacune de la Filler calcaires et de boules sphériques a l'intérieur du cylindre creux de l'appareil micro-Deval de manière à mettre des poids approximativement égaux dans les 04 cylindres.



Figure II. 15 : Filler calcaires et de boules sphériques à l'intérieur du cylindre.

Remplacer le couvercle et ferme les boulons de fixation

Mise en place les quatre cylindres dans la machine. Faire fonctionner la machine de sorte qu'elle effectue 12000 rotations à une vitesse normale en deux heures, le dispositif permet au moteur de s'arrêter automatiquement, Nous séparons Filler calcaires des bille à l'aide d'un tamis (tami 0.4mm).




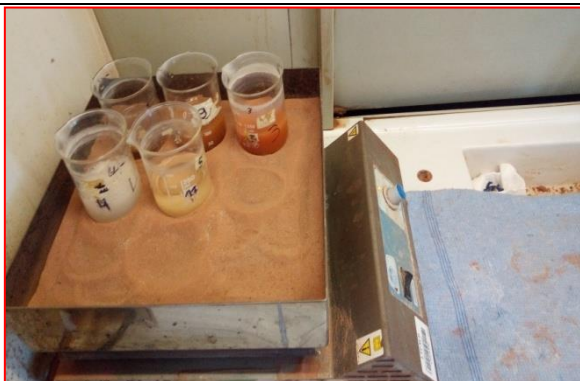
#### II.2.6. Caractérisation chimique des matériaux :

Le (Tableau II. 6) montre la méthode d'analyse chimique des matériaux utilisés dans notre étude où sa composition chimique a été déterminée à l'aide des analyses chimiques effectués dans laboratoire chimie de LTPS L'analyse des matériaux utilisé a révélé l'existence des éléments qui sont présentés dans les tableaux (Tableau II. 7 et II. 8 et II. 9) :

Tableau II. 6 : mode opérations des analyses chimiques des matériaux  
(Filler calcaire et sable et bentonite).



## CHAPITRE II : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

<p>Brules l'échantillon dans le four a 85 degrés celsius pendant 48h sortez le cru cible du four après refroidissement .nous tamisons le matériau a travers un tamis de 0,4 mm</p>	
<p>Le poids du creuset est vide, alors on y met <math>m_0=1</math> gramme de sable et on note le poids</p>	
<p>Mesures 10 ml de solution d'acide chlorhydrique 10% et versez dans les bécher et contenant l'échantillon</p>	
<p>Places les becher sur une plaque chauffante 65°C pour faire bouillir l'échantillons dans la solution acide pendant 10a15min</p>	



Filtrez maintenant la solution de cendres a l'aide du papier filtre d'Ashley lavez le creuset a l'eau chaude et transférez le lavage dans le papier filtre pour assurer le transfert complet des l'échantillon.

Ajouter de l'eau chaude supplémentaire au papier filtre en le lavant pour s'assurer qu'il ne reste aucun résidu d'acide chlorhydrique avec le papier filtre.



### DETERMINATION DES SULFATES

Verser la solution dans un bécher jusqu'a ce qu'elle atteigne 200 ml. On remet au four 65° a ébullition seulement lorsqu'on la sort On a ajoute 25 ml de  $\text{BaCl}_2$  5% (pour précipite  $\text{SO}_4^{2-}$ )

Et ici, nous avons remarqué que la bentonite avait des sulfates et Sable et Filler calcaire ne contient pas sulfate,



alors nous fait le filtrat pliez soigneusement bentonite pour éviter la perte du filtre et placez, la dans le creuset prépare .nous le séchons au four a 85°C Et puis brulez le contenu dans un four a 463°C Celsius pendant 48h sortez donc le creuset du four après refroidissement et son poids m4



Prenez le poids du creuset contenant de l'acide dans la cendre soluble .notez le poids pour l'utilises dans le calcule.

**TENEUR EN CARBONATE DE CALCIUM  $\text{CaCO}_3$  :**

Dans un Becher, nous mettons 1g la bentonite et y ajoutons un peu de  $\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$  à travers une pipette et y ajoutons également 10ml de l'eau distillée  $v_a$  et mélangeons

On met Becher sous la burette qui contient de l'hydroxyde de sodium et on ouvre le robinet et quand on remarque un changement de couleur de la solution on ferme le robinet ( $v_b$  le volume de NaOH)

Notez le volume d'hydroxyde de sodium qui a diminué.



Les Tableaux suivant expliquent le résultat des essais

Tableau II. 7 : Détermination des insolubles.

Echantillon	Bentonite	Filler calcaire	Sable
Prise d'essai : $m_0$ (g)	1	1	1
Creuset+précipité : $m_2$ (g)	29.483	30.869	29.827
Creuset vide : $m_1$ (g)	28.718	30.831	28.901
% insolubles : $\frac{m_2-m_1}{m_0} * 100$	76.5	3.4	92.6

Tableau II. 8 : Détermination des sulfates.

Echantillon	bentonite
Prise d'essai : $m_3$ (g)	1
Creuset+précipité : $a$ (g)	29.909
Creuset vide : $b$ (g)	29.902
$m_4=a-b$	0.007
$SO_3(\%) : 0.343 * \frac{m_4}{m_3} * 100$	0.24

Tableau II. 9 : Dosage en retour des carbonates de calcium  $CaCO_3$ .

Echantillon	Bentonite	Filler calcaire	sable
Prise d'essai : $m_0$ (g)	0.5	0.5	0.5
Volume HCL : $V_a$ (cm <sup>3</sup> )	10	10	10
Chute de NaOH : $V_b$ (cm <sup>3</sup> )	9.6	3.3	9.5
Volume d'acide régissant $X=V_a - V_b$ (cm <sup>3</sup> )	0.4	6.7	0.5
Teneur en $CaCO_3 : \frac{5.X}{m_0}$	04	67	05

### II.3. Méthode de formulation de mortier cimentaire :

Nous avons utilisé dans notre programme expérimental des mortiers de forme cubique  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ .





Figure II. 16 : Moules ayant servi à la fabrication des éprouvettes.

Dans le cadre de l'élaboration des matériaux locaux, neuf mélanges ont été utilisés pour l'ensemble des mélanges, la proportion d'eau et de sable est constante (sable = 1350 g et eau = 315 g ) , et les proportions des autres mélanges se répartissent comme montre le Tableau II .

Tableau II. 11 : formulation des mélanges la fabrication du mortier.

<b>Notation</b>		<b>C</b>	<b>L</b>	<b>B</b>
<b>A</b>	<b>A1</b>	405	22.5	22.5
	<b>A2</b>	382.5	22.5	45
	<b>A3</b>	360	22.5	67.5
<b>B</b>	<b>B1</b>	382.5	45	22.5
	<b>B2</b>	360	45	45
	<b>B3</b>	337.5	45	67.5
<b>C</b>	<b>C1</b>	360	67.5	22.5
	<b>C2</b>	337.5	67.5	45
	<b>C3</b>	315	67.5	67.5

Avec : C = ciment ; L= limestone (filler calcaire) ; B= bentonite



Figure II. 17 : Ciment et filler et bentonite.

Le malaxage des mélanges a été réalisé selon la norme EN 196 au service de mortier au niveau de laboratoire LTPS. Nous mettons d'abord de l'eau et du ciment et mélangeons 30 secondes, puis de filler calcaire y est ajoutée et immédiatement après cette bentonite et mélangeons chacun d'eux pendant 15 secondes, nous ajoutons du sable et mélangeons pendant 60 secondes à vitesse constante et 60 secondes à un moyen vitesse tout en éliminant les résidus en suspension pour assurer de bonnes proportions ; C'est-à-dire que le temps de mélange total est de 03 minutes.

On le met dans table à secousse (Figure II. 19) pour évacuer l'air du mélange



Figure II. 18 : Mixeur de mortier.



Figure II. 19 : Table à secousse.

## CHAPITRE II : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

Les échantillons d'essai sont conservés à l'air humide pendant 24 heures, après cette période, les échantillons sont marqués, démoulés, immergés dans solution de la chaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  à une température de  $45^\circ\text{C}$ .



Figure II. 20 : Échantillons du mortier avant démoulés.



Figure II. 21 : Échantillons du mortier l'immerge dans solution de la chaux.



Figure II. 22 : Conservation à  $45^\circ\text{C}$ .

### II.4. Méthodes expérimentales :

#### II.4.1. Variation de la masse :

Nous mesurons la masse des trois échantillons de chaque gâchée avec une balance a précision de  $0.01\text{g}$  la même balance que nous utilisons pour mesurer tous les échantillons (Figure II. 23 ).



Figure II. 23 : Balance 0.01g.

La saturation des éprouvettes en eau est contrôlée à l'aide du suivi de leur masse, Une fois les éprouvettes saturées en eau, on les sèche à l'aide d'un four pour accélérer ce processus La température du four est fixée à 45°C (Figure II. 24).



Figure II. 24 : Conservation à 45 °C.

#### II.4.2. Essai de flexion et de compression :

La résistance à la compression a été calculée avec la moyenne de trois mesures. Elle a été mesurée après 7, 14, 30 jours d'exposition à une solution de chaux à 45°C. Cette résistance a été mesurée sur un échantillon cubique (40×40×40 mm<sup>3</sup>) en utilisant la méthode d'essai recommandée par la norme EN 196-1 [10].

Pour cela on applique un chargement et l'on note l'effort à rupture ; Ce processus se fait avec les étapes suivantes : Retirez l'échantillon de l'eau après le temps de traitement spécifié et essuyez l'excès d'eau de la surface.



Figure II. 25 : Machine de compression/flexion.

### II.4.3. Essai de flexion :

Une barrette du matériau à tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de la barrette une force croissante.

La rupture se produit immédiatement, lorsque la capacité de résistance à la traction du béton dans la fibre inférieure est atteinte sous le point de chargement.

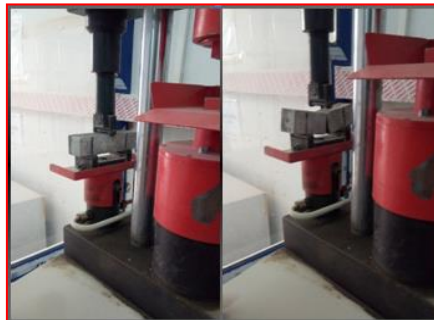


Figure II. 26 : Essai de résistance à la flexion.

### II.4.4. Essai de compression :

- 1- Placer l'échantillon dans la machine de manière à ce que la charge soit appliquée sur le cube.
- 2- Aligner l'échantillon au centre de la plaque de base de l'appareil.
- 3- La charge est appliquée progressivement sans choc.



4- Enregistrez la charge maximale.



Figure II. 27: Essai de résistance à la compression.

#### **II.4.5. Porosité accessible à l'eau :**

Les échantillons ont d'abord été séchés dans une étuve à 55 °C, jusqu'à stabilisation de la masse ( $M_d$ ), l'air présent dans les pores de mortier a été évacué à l'aide d'une pompe à vide (Figure II.28) de temps 3 heures, Les échantillons sont immergés dans l'eau .

La masse des cubes de mortier entièrement saturés a été mesurée dans l'air ( $M_{SA}$ ) et sous l'eau ( $M_{SW}$ ) (Figure II. 29), puis La porosité totale ( $P$ ) calculée en utilisant l'équation :

$$P = \frac{(M_{SA} - M_d) \times 100}{(M_{SA} - M_{SW})}$$

Avec :

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

$M_d$  : est la masse sèche , et  $M_{SW}$  : est la masse saturée d'eau sous l'eau.



Figure II. 28 : Appareil vide l'air.



Figure II. 29 : Balance de l'eau.

#### II.4.6. Absorption capillaire :

Les mesures de capillarité sont réalisées selon les prescriptions de la norme AFPCAFREM sur éprouvettes de dimensions 40x40 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 lit de gravier 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 :

$$C = \frac{M_t - M_0}{A}$$

C : Coefficient d'absorption capillaire ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

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

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

A : Section immergée de l'éprouvette ( $\text{m}^2$ )

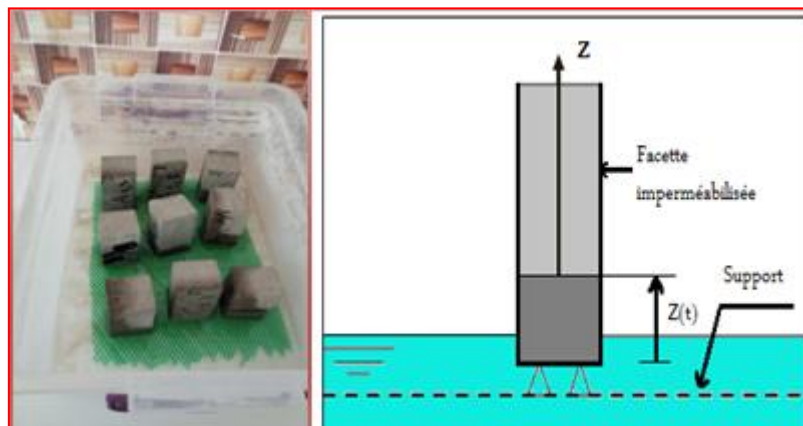


Figure II. 30 : Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire.

**II.5. Conclusion :**

Nous avons conclu de ce chapitre la possibilité de remplacer le ciment et de former un produit local économique qui dépend des matériaux locaux disponibles en abondance par des expérimentations. Le reste du travail consiste en des résultats obtenus à partir de la compressibilité et de la flexion.



### II.6. Référence :

- [1] La norme NA 442 Ciments : composition, spécification et critères de conformité des ciments courants.
- [2] La norme NF EN 197-1 Avril 2012 Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.
- [3] La norme P18-598, octobre 1991,8 p , Granulats - Équivalent de sable Dans la série des normes P 18-... qui concerne les granulats, la présente norme définit une méthode d'évaluation de la propreté des fines d'un sable.
- [4] La norme NF EN 933-8 Août 1999 Partie 8 : Évaluation des fines — Équivalent de sable.
- [5] Pr. Naceri.A.GH - Mr.Zitouni.S ‘’durabilité d'un béton exposé à un milieu agressive(acide sulfurique), influence de la forme des granulats (concassé-roulées)’’ Université Mohamed Boudiaf - M’sila 2015-2016 .
- [6] La norme NF EN 1097-5, octobre 2008, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 5 : détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée.
- [7] La norme NF EN 933-1, Mai 2012, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage.
- [8] La norme NF P 18-560, Septembre 1990, Norme française, Analyse granulométrique par tamisage.
- [9] La norme NF P18-554, décembre 1990, 5 p, Matériaux et produits minéraux Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux .
- [10] La norme NF EN 196-1, septembre 2016, Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances.

## CHAPITRE III : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

### III.1 Introduction :

Nous présentons dans ce chapitre les résultats et l'analyse des essais physiques et mécaniques (la masse volumique, la résistance à la compression, et la résistance à la traction par flexion, la porosité accessible à l'eau, absorption capillaire d'eau) effectués sur des éprouvettes les divers élaborés de mortier, et l'influence de la température de la cure sur eux. Formulations des mortiers à base de pourcentages variables de bentonite calcinée et de fillers calcaires, selon (Tableau III.1) puis nous les mettrons dans de l'eau et de la chaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  à une température de la cure de 45 °C pendant 7, 14, 30 jours .

Tableau III. 1: Formulation des mortiers étudiés

Notation		en pourcentage (%)		
		Ciment	L*	B*
<b>A</b>	A1	90%	5%	5%
	A2	85%	5%	10%
	A3	80%	5%	15%
<b>B</b>	B1	85%	10%	5%
	B2	80%	10%	10%
	B3	75%	10%	15%
<b>C</b>	C1	80%	15%	5%
	C2	75%	15%	10%
	C3	70%	15%	15%

\*(L= Limestone ) (B= Clay bentonite )

### III.2 La Masse volumique :

Les masses volumiques des différents mélanges contenant différents pourcentages des additions (cure dans l'eau à 45°C) présentées dans le Tableau III. 2 suivantes :

Tableau III. 2 : La Masse volumique.

	7jours	14jours	30jours
A1	2185,469	2177,93	2175,313
A2	2159,531	2172,891	2146,094
A3	2157,813	2171,016	2172,891
B1	2148,867	2139,102	2181,172
B2	2191,875	2161,016	2185,117
B3	2205,742	2144,258	2166,953
C1	2135,43	2137,344	2192,539
C2	2147,031	2168,125	2204,219
C3	2176,484	2188,047	2148,359

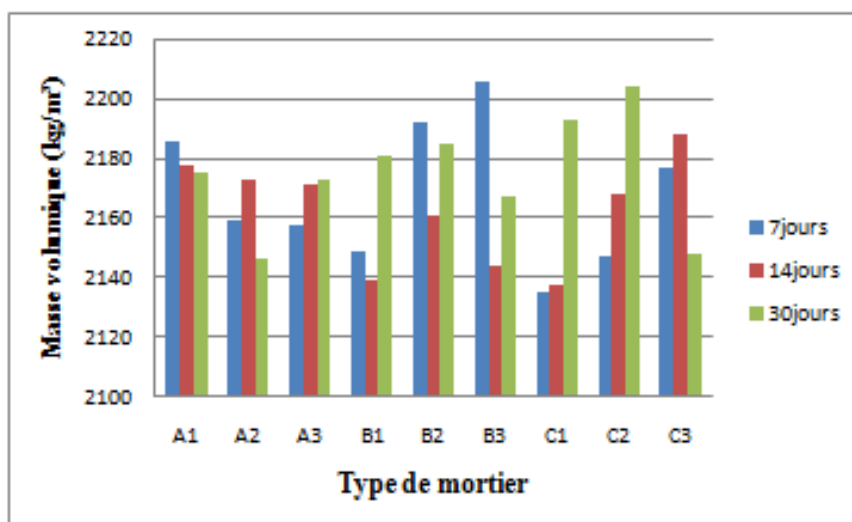


Figure III. 1: La Masse volumique  $\text{kg/m}^3$ .

D'après la Figure III. 1, les résultats obtenus montrent que la valeur de la masse volumique dans la composition B3 après 7 jours et C3 après 14 jours et C2 après 30 jours, enregistrent une valeur la plus élevée égale à 2205.74, 2204.22, 2188.05  $\text{Kg/m}^3$  est la plus supérieure que les autres compositions à 7, 14 et 30 jours.

### III.3 Résistance à la Compression :

Le tableau III.1 et la figure III.2 présentent l'évolution des résistances à la compression. Des résultats obtenus à partir d'échantillons à une température de 45 C°, on remarque que lorsqu'on ajoute 5% de filler calcaire semble idéal, et ce après l'avoir additionné avec de la bentonite calcinée par rapport d'autres valeurs qui étaient proches, de sorte que la capacité de cette augmentation est de 66 KN au bout de 30 jours et de 60 KN au bout de 14 jours et de 47

### CHAPITRE III : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

KN au bout de 7 jours, et ceci après la montée en température, qui a joué un rôle dans l'amélioration de la résistance à la compression.

Remarque : Nous notons que lors de l'ajout de 10% de filler calcaire avec le pourcentage de bentonite calcinée (5 – 10– 15%) en C1, C2 et C3 n'ont pas donné un résultat acceptable.

Tableau III. 3 : Résultats de Résistance à la compression (KN) après 7, 14 et 30 jours

Clay (%)	Résistance à la compression (KN)		
	7 Jours	14 Jours	30 Jours
A1	47	50	57
A2	42	42	63
A3	45	60	66
B1	34	42	43
B2	43	49	52
B3	45	47	42
C1	34	37,5	60
C2	28	37,5	61
C3	37	40	50

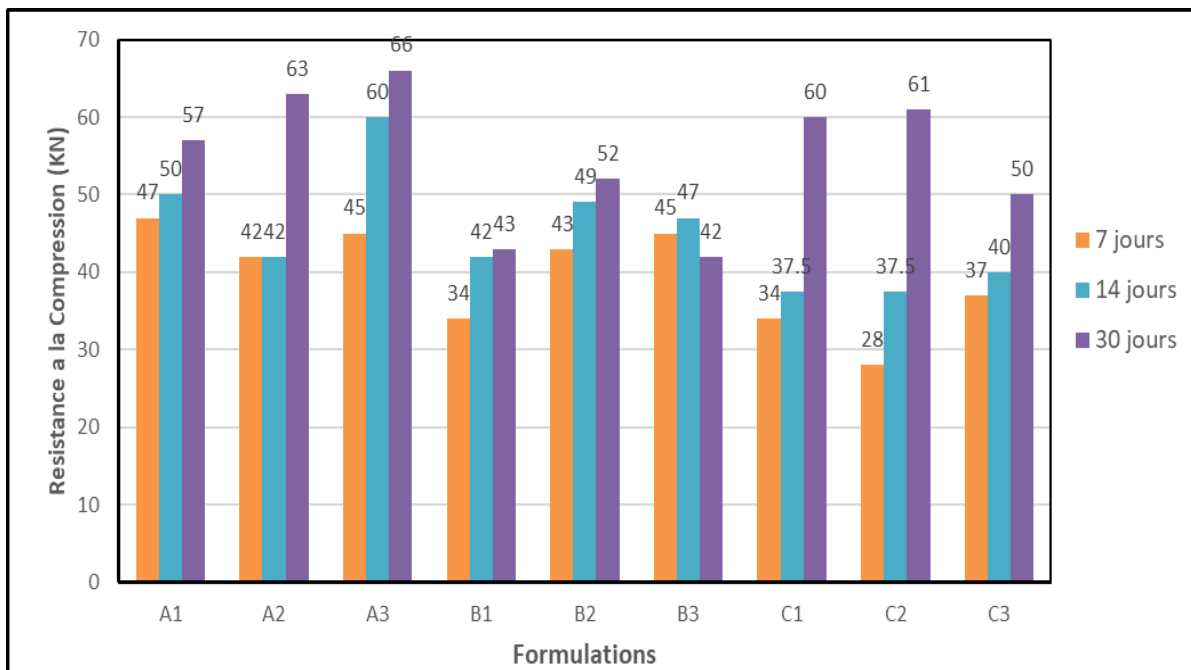


Figure III. 2: Résistance à la compression (KN) après 7, 14 et 30 jours.

III.4 Résistance à la Flexion :

Tableau III. 4 : Résultats de Résistance à la Flexion (KN) après 7 , 14 et 30 jours

Clay	Résistance à la Flexion (KN)		
	7 Jours	14 Jours	30 Jours
A1	1,8	2,5	3,28
A2	1,81	1,8	3,24
A3	2,15	1,9	3,22
B1	1,6	2	1,95
B2	1,87	2,04	2,9
B3	2,17	2,16	2,85
C1	1,63	2	3,18
C2	1,27	1,9	3,29
C3	1,22	1,64	3,11

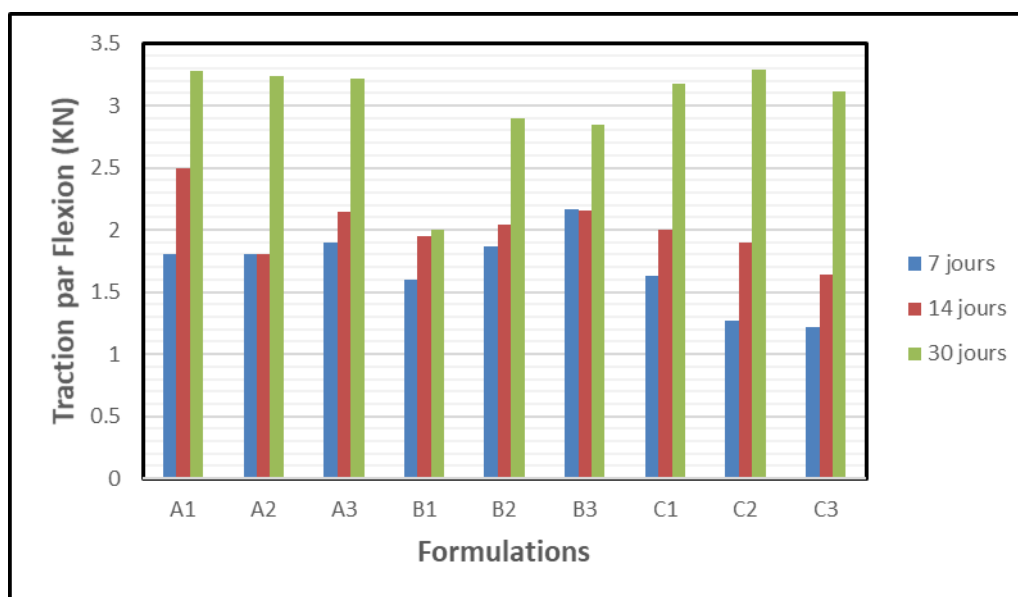


Figure III. 3 : Résultats de Résistance à la Flexion (KN) après 7, 14 et 30 jours.

L'analyse des résultats de la Figure III. 3 et le Tableau III. 4 permet d'apporter les commentaires suivants :

Après 7 jours d'immersion à 45 °C, on remarque que les échantillons A3 et B3 en ajoutant le rapport (10L15B et 5L15B) ils ont permis d'augmenter la résistance mécanique à la résistance à la traction des échantillons jusqu'à 2.15 KN et 2,17 KN, en plus on observe une diminution

### CHAPITRE III : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

---

de la résistance avec l'augmentation des pourcentages. Pour les ajouts, sauf pour la résistance en B2, A2 et A1, on constate une évolution de la résistance, mais elle reste inférieure à la résistance existante. Après 14 jours, nous remarquons que dans A1 et B3 en ajoutant les rapports 5L5B et 10L15B, il est permis d'augmenter la résistance mécanique à la résistance à la traction des échantillons jusqu'à 2,5 KN et 2,16 KN. Pour les additions, sauf pour la force en A3, B2 et C1, on note une évolution de la résistance, mais elle reste inférieure à la résistance existante.

à 30 jours :

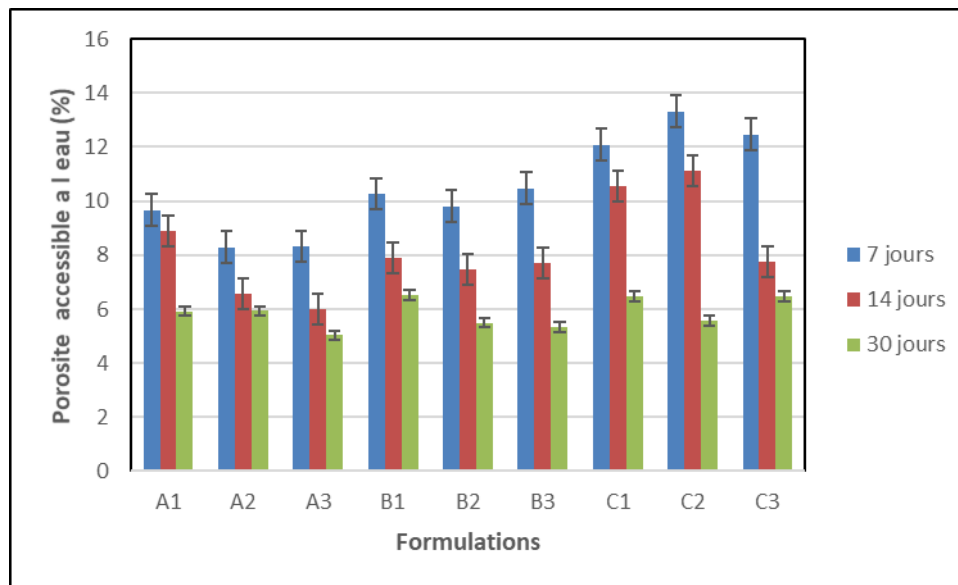
On note qu'en A1 et C2, en ajoutant les rapports 5L5B et 15L10B, il est permis d'augmenter la résistance mécanique à la résistance à la traction des échantillons jusqu'à 3,28 KN et 3,29 KN selon la raideur en conditions naturelles que dépasse cette valeur et on note une diminution de la résistance avec l'augmentation des pourcentages. Pour les additions, sauf pour la résistance en A2, A3, C1 et C3, on note une évolution de la résistance, reste inférieur à la résistance existante.

#### III.4 Porosité accessible à l'eau :

La porosité accessible à l'eau pour les pâtes avec différent pourcentage de la bentonite calcinée et filler calcaire après la cure d'un 7, 14 et 30 jours. Les résultats répertoriés dans le Tableau III. 5 et sont présentés dans la Figure III.4

Tableau III. 5: Résultats de Porosité accessible à l'eau après 7, 14 et 30 jours.

Clay (%)	Porosité accessible à l'eau		
	7 Jours	14 Jours	30 Jours
<b>A1</b>	9,664	8,901	5,921
<b>A2</b>	8,290	6,549	5,929
<b>A3</b>	8,323	5,978	5,027
<b>B1</b>	10,268	7,902	6,519
<b>B2</b>	9,807	7,451	5,498
<b>B3</b>	10,477	7,726	5,323
<b>C1</b>	12,088	10,569	6,465
<b>C2</b>	13,315	11,127	5,557
<b>C3</b>	12,471	7,739	6,486



**Figure III. 4 : Résultats de Porosité accessible a l'eau après 7 , 14 et 30 jours ..**

A 7 jour, Le taux de porosité des échantillons C1 et C3 a augmenté, puisque leur porosité a atteint 13,3 % et 12,5 %, quant aux autres échantillons, il a enregistré une diminution, et il se situe entre 8 % et 12,08 %.

À 14 jours, la porosité était faible par rapport à 7 jours, où l'échantillon a enregistré C2 comme pourcentage le plus élevé, atteignant 11,12 %, et pour les autres échantillons, il a enregistré une diminution entre 5,02 % et 10,56 %.

Et à 30 jours, la porosité était très faible, et elle a enregistré 6,52 % comme porosité maximale de l'échantillon B1 par rapport aux porosités de 7 et 14 jours, et une baisse a été enregistrée pour le reste des échantillons entre 5,02 % et 6,48 %.

### III.5 Absorption capillaire d'eau :

Cet essai mesure le taux d'absorption capillaire de l'eau des éprouvettes de mortier après la cure de 7, 14, 30 jours dans 45 °C, les résultats obtenus après 0, 5, 10, 15, 30, 45, 60 et 90 min de test d'absorption capillaire, sont regroupés dans les ( Tableau III. 6) et (Tableau III. 7) et (Tableau III. 8) et dessin sont présentés sous forme de courbes dans la (Figure III. 5) et (Figure III. 6) et (Figure III. 7) comme suivant :

Tableau III. 6: Absorption capillaire d'eau après 7 jours.

Clay (%)	0 Min	5 min	10 min	15 min	30 min	45 min	60 Min	90 Min
A1	0	1,081	1,387	1,65	2,231	2,612	2,9	3,437
A2	0	1	1,312	1,587	2,162	2,569	2,85	3,444
A3	0	0,819	1,081	1,275	1,744	2,05	2,281	2,756
B1	0	0,75	1,006	1,206	1,681	2,006	2,262	2,737
B2	0	0,894	1,181	1,431	1,95	2,306	2,569	3,031
B3	0	0,731	0,944	1,131	1,6	1,831	2,037	2,412
C1	0	0,981	1,225	1,512	2,087	2,419	2,7	3,2
C2	0	1,019	1,344	1,637	2,269	2,631	2,925	3,425
C3	0	1,006	1,219	1,481	2,019	2,356	2,6	3,019

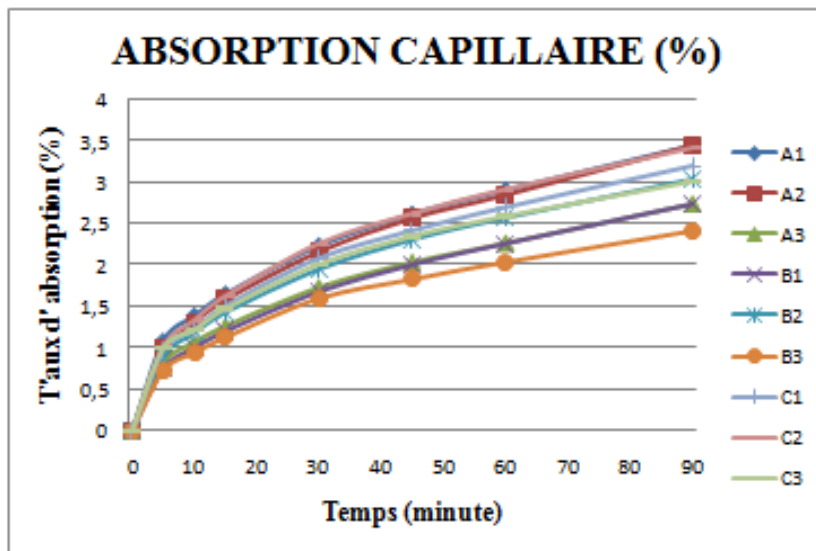


Figure III. 5: Absorption capillaire d'eau après 7 jours



Tableau III. 7 : Absorption capillaire d'eau après 14 jours

Clay (%)	0 min	5 min	10 min	15 Min	30 min	45 min	60 min	90 Min
A1	0	0,475	0,669	0,875	1,262	1,437	1,606	1,806
A2	0	0,269	0,469	0,537	0,831	0,975	1,112	1,306
A3	0	0,244	0,331	0,444	0,6	0,744	0,856	1,012
B1	0	0,519	0,694	0,862	1,169	1,412	1,575	1,844
B2	0	0,431	0,612	0,769	1	1,194	1,325	1,512
B3	0	0,275	0,356	0,469	0,656	0,769	0,862	1,05
C1	0	0,537	0,756	0,994	1,406	1,675	1,9	2,25
C2	0	0,7437	1,069	1,369	1,869	2,194	2,437	2,837
C3	0	0,675	0,962	1,181	1,625	1,944	2,225	2,65

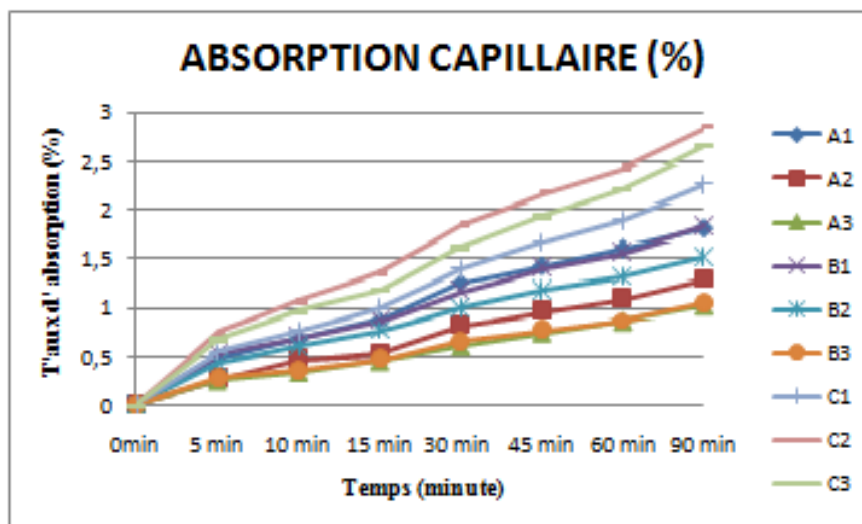


Figure III. 5: Absorption capillaire d'eau après 14 jours

Tableau III. 8 : Absorption capillaire d'eau après 30 jours.

Clay (%)	0 min	5 Min	10 min	15 min	30 min	45 min	60 min	90 Min
A1	0	0,894	1,062	1,25	1,706	1,969	2,206	2,587
A2	0	0,775	1,012	1,119	1,544	1,825	2,031	1,819
A3	0	0,694	0,862	1,01	1,4	1,662	1,894	2,156
B1	0	0,894	1,119	1,306	1,8	2,1062	2,425	2,756
B2	0	0,106	0,237	0,369	0,737	0,987	1,269	1,694
B3	0	0,844	0,987	1,806	1,556	1,762	2,05	2,419
C1	0	1,194	1,544	1,806	2,594	3,012	3,512	4,006
C2	0	1,037	1,85	1,412	1,925	2,237	2,569	2,975
C3	0	0,894	1,156	1,312	1,875	2,181	2,475	2,906

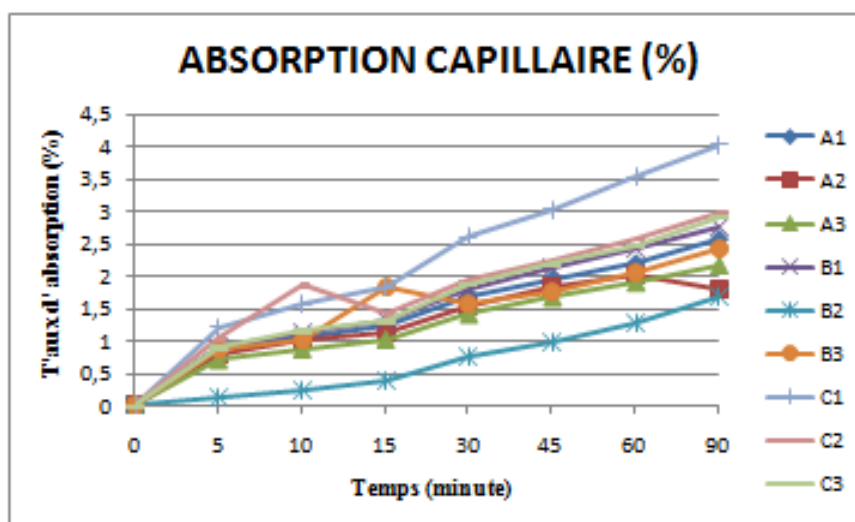


Figure III. 6 : Absorption capillaire d'eau après 30 jours.

D'après Les résultats des courbes sont dans les ( Figure III.5 , III.6 , III.7 ) montrent l'influence de la température sur l'absorption capillaire des échantillons de mortier, On peut voir que la quantité d'eau absorbée par toutes les compositions testées augmente progressivement dans le temps , La quantité d'eau absorbée Cela est particulièrement dans les échantillons qui contiennent le grand pourcentage de bentonite calcinée et de filler calcaire le coefficient d'absorption capillaire donne une idée de la porosité capillaire des mortier , lorsque la porosité capillaire augmente.

### **III.6 Conclusion :**

Selon les résultats obtenus : On peut conclure que la bentonite calcinée et les charges ont amélioré les propriétés mécaniques des produits cimentaires compte tenu de l'évolution générale de l'utilisation de produits à haute qualité environnementale. La résistance mécanique à la compression du coulis ajouté à 5 % s'est révélée satisfaisante en filler calcaire à 15 % de bentonite calcinée. Une température élevée augmente la résistance du mortier et une augmentation du pourcentage de bentonite calcinée et de filler calcaire affecte la résistance du mortier.

---

## CONCLUSION GENERAL

Les travaux réalisés dans le cadre de ce thème nous ont conduits à est une contribution aux travaux de valorisation des matériaux locaux dans les matériaux cimentaires. Notre étude a permis de confirmer la possibilité de valoriser l'argile de type montmorillonite (bentonite) de la région de Maghnia (Tlemcen) et filler calcaire de Ghardaïa en tant que matériaux substituables en partie au ciment.

Une étude bibliographique a été présentée au début de ce mémoire pour mettre en relief le mortier et les ajouts minéraux en général et la bentonite en particulier, l'effet des ajouts minéraux sur les caractéristiques des mortiers et Aussi, il a été décrit dans ce mémoire, les différents travaux de recherche qui ont été menés dans le même contexte (ciment, mortier, bentonite et filler calcaire).

Dans la deuxième partie. Comme contribution à ces travaux, il a été réalisé dans cette étude, une série d'essais expérimentaux pour l'identification et la caractérisation des matériaux utilisés à savoir le ciment, le sable, la bentonite calcinée, le filler calcaire.

L'optimisation du broyage filler calcaire/argile bentonite a été étudiée afin de sélectionner les paramètres les plus adaptés au procédé clinker. Ces matériaux peuvent être utilisés pour réduire l'impact environnemental du ciment et du béton, notamment en réduisant les émissions de dioxyde de carbone en premier lieu. Nous avons étudié différents paramètres tels que le rapport de poudre et le temps de broyage, et nous avons observé que l'utilisation de différents rapports avait un effet sur la structure du mélange.

En effet, la température de calcination de la bentonite (l'activité pouzzolanique de l'argile calcinée) à 750°C a un effet important sur la résistance à la compression du mortier. Cela renforce l'importance de comprendre la minéralogie et le comportement thermique des argiles mixtes pour déterminer leur température de calcination optimale comme solution efficace, permettant la préparation de coulis de ciment avec les mêmes propriétés mécaniques dans le reste de l'ouvrage.

Les mortiers à base de ciment minéralisé (bentonite calcinée et fillers calcaires) présentent des propriétés physiques et mécaniques améliorées à 45°C.

---

Des études de durabilité ont été menées pour comprendre le comportement de ces matériaux. Nous avons testé 9 échantillons différents (5%, 10%, 15%) et les résultats obtenus à du coulis ajouté à 5% s'est révélée satisfaisante en filler calcaire à 15% de bentonite calcinée, ont été très encourageants comme les propriétés mécaniques du lier, l'augmentation de la résistance à la compression à 66 MPa à 30 jours, et les résultats des tests d'adsorption ont indiqué que les propriétés de durabilité du ciment a été partiellement améliorée après son remplacement par de l'argile calcinée activée. Cette amélioration est principalement due à l'application d'un traitement thermique, la résistance à la compression augmente à court et à long terme, et l'absorption d'eau et la porosité augmentent en raison du traitement thermique.

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 les ressources naturelles et l'environnement.

### **Recommandations :**

Au vu des conclusions ci-dessus, nous recommandons :

- L'utilisation d'argiles bentonite à basse teneur en kaolinite comme substituant du ciment dans la construction.
- Effectuer une étude technico-économique sur les différentes procédures de valorisation des ajouts afin de faire des choix éclairés.
- Une analyse microstructurale plus poussée doit être effectuée pour confirmer les résultats de ces études.

# ANNEXE 1 :



50kg

**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 50%	Sable (sec) 0/5	Gravillons (sec) 8/15mm 20/40 15/25mm	Eau (litres)
<b>Dosage pour béton</b> 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 <sup>2</sup> /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 2 :

## FICHE TECHNIQUE

### BENTONITE DE FONDERIE

#### Composition Chimique

SiO <sub>2</sub>	55 - 65	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12 - 18	%
Na <sub>2</sub> O <sup>3</sup>	1 - 3	%
CaO	1 - 5	%
K <sub>2</sub> 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 <sup>2</sup>
Compression à sec	3200	g/cm <sup>2</sup>
Cisaillement	190	g/cm <sup>2</sup>

#### 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 3 :

## 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	Bentonite brisque	filler Calcaire	Sable				
Prise d'essai : $m_0$ (g)	1g	1g	1g	1g			
Creuset+précipité : m2 (g)	29,483	26,485	30,869	29,827			
Creuset vide : m1 (g)	28,718	25,66	29,831	28,901			
% Insolubles : $\frac{(m2 - m1) \times 100}{m_0}$	76,5	82,5	3,4	92,6			

L'Opérateur

Visa du responsable

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ANALYSE CHIMIQUE  
 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	Alles 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	0,5	0,4				

L'Opérateur

Visa du responsable

F-5-5cb.02



**LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD**

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

Structure : .....  
 N° Dossier interne : .....  
 Echantillon : .....  
 Équipements utilisés : .....

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

Echantillon		Bentonite	bruyère						
Prise d'essai : m <sub>3</sub> (g)		1,08	1,08	1,08	1,08				
Creuset+précipité : a (g)		29,909	30,039						
Creuset vide : b (g)		29,906	30,018						
m <sub>4</sub> = a - b (g)		0,007	0,027						
SO <sub>3</sub> (%) = 0.343 x (m <sub>4</sub> /m <sub>3</sub> ) x 100		0,24	0,95						

L'Opérateur

Visa du responsable