

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de master

Présentée à l'Université 08 mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structure

Présentée par :

REDADAA FAYZA

MAHAMDI SAMIRA

**Thème : Caractérisation physiques et de durabilité
Des ciments composés à base de brique**

Sous la direction de : **DR. NIGRI GHANIA**

JUIN 2018

REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah, le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

✚ Nous voudrions exprimer nos vifs remerciements à mon encadreur

Mme. Nigri Ghania pour avoir accepté de nous prendre en charge.

✚ Nous voudrions aussi remercier tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

✚ Que tous les membres du jury trouvent ici l'expression de mes profonds Respects pour avoir pris la peine d'examiner notre mémoire.

✚ Nos remerciements vont également à tous ceux et celles qui, de près ou de loin nous ont apporté aide et encouragement. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Je dédie ce travail

À mon père

À ma mère

À mes frères et mes sœur

À tous mes amies

Et à toute ma famille

Samira

Je dédie ce mémoire de fin d'études

*Ma très chère mère **DENDANE ZAHYA** et mon très cher père **ABDELWAHHAB**, pour leur soutien, et les sacrifices et tous leurs efforts consentis pour mon éducation et ma formation*

*A mon frère et ma petite sœur **MEHDYA***

A toute ma famille

*A ma chère sœur **SANA** qui j'ai traversée toutes les épreuves de cette année inoubliable,*

*A mon fiancé **HAMZA** qui as toujours été présent pour les bons conseils, malgré la distance.*

Faizi

Résumés

مخلص

نناقش في هذا البحث الخصائص الفيزيائية والديمومة للإسمنت المصنع انطلاقا من بقايا الأجر المطحونة و تستعمل هذه الأخيرة كبديل جزئي للكلنر في الإسمنت المركب الذي يتم انتاجه من خلال طحن و تجانس الكلنكر مع بقايا الأجر بالجبس تم تحديد اربعة عينات تختلف فيها نسبة الأجر المضافة 0؛10؛20؛30%.

ان ادخال غبار الأجر في الإسمنت يحسن من اداء و صلابة الملاط المكون من ها ذا الإسمنت مقارنة مع الإسمنت الشاهد بدون اضافة الأجر

الكلمات المفتاحية: بقايا الأجر، الشعرية ، المسامية،

Résumé

Nous discutons dans ce travail de recherche les caractéristiques physiques et de durabilité des nouveaux ciments fabriqués à base de déchets de brique broyée. Ces déchets sont utilisés comme une substitution partielle du clinker dans le ciment. Les ciments composés ainsi produits sont obtenus par broyage et homogénéisation du clinker, déchets de brique et du gypse. Quatre compositions contenant 0, 10, 20 et 30% de déchets de brique sont préparées et soumises à différents essais de caractérisation.

L'introduction de la poudre de brique dans le ciment à améliorer les performances de durabilité des mortiers formulés à base de ce ciment par rapport au mortier de référence préparé avec 0% d'ajout et plus particulier à l'attaque par l'acide sulfurique (H_2SO_4) suite à la fixation de la portlandite par la pouzzolane.

Mots clés : Déchets de brique; Durabilité; Capillarité; Porosité; Réaction pouzzolanique.

Abstract

In this research, we discuss the physical and durability characteristics of new cements prepared with waste crushed brick. This waste is used as a partial substitution of clinker in cement. The composite cements thus produced are obtained by grinding and homogenizing clinker, waste brick and gypsum. Four compositions containing 0, 10, 20 and 30% of waste brick are prepared and subjected to various characterization tests.

The introduction of brick powder in cement improved the durability performance of mortars formulated with this cement compared to the reference mortar prepared with 0% addition and more particular to attack by sulfuric acid (H_2SO_4) following the fixation of portlandite by pozzolan.

Keywords: waste Brick; Durability; Capillarity; Porosity; Pozzolanic reaction.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Composition chimique du laitier de haut fourneau.....	6
Tableau 1.2 : Types de ciment et composition	9
Tableau 1.3 : Spécification mécaniques et physiques	10
Tableau 1.4 : cimenteries Algériennes et l'utilisation des ajouts	17
Tableau 2.1 : Composition chimique du clinker utilisé	36
Tableau 2.2 : Composition minéralogique du clinker	37
Tableau 2.3 : Composition chimique des déchets de briques utilisés	37
Tableau 2.4 : Composition chimique du gypse utilisé	38
Tableau 2.5 : Désignation et dosage des ciments élaborés	39
Tableau 2.6 : Teneur en oxyde des ciments anhydres (teneur moyenne en masse)	39
Tableau 2.7 : Malaxage d'un mortier normal	40
Tableau 2.8 : Limite de temps	43
Tableau 3.1 : Volume de l'EDTA du dosage des ions calcium dans les solutions Préparées.....	52
Tableau 3.2 : Résistance mécanique des mortiers de ciments élaborés	53
Tableau 3.3 : Masses volumiques des ciments élaborés	53
Tableau 3.4 : Résultat d'Absorption d'eau par Capillarité	54
Tableau 3.5 : Résultats d'absorption d'eau par immersion totale	55
Tableau 3.6 : Résultat de Porosité accessible à l'eau	56
Tableau 3.7 : Variation des masses en (g) des éprouvettes conservées dans l'eau potable..	57
Tableau 3.8 : Variation des masses en (g) des éprouvettes conservées dans l'eau de mer..	58
Tableau 3.9 : Variation des masses en (g) des éprouvettes conservées dans l'acide sulfurique.....	59
Tableau 3.10 : Comparaison entre les éprouvettes conservées	61

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Pâte de ciment hydratée à 7 jours	11
Figure 1.2 : Cristaux de Portlandite	12
Figure 1.3 : Morphologies des hydrates (MEB)	14
Figure 1.4 : Aiguilles d'étringite	14
Figure 1.5 : Monosulfoaluminate	14
Figure 1.6 : brique en terre crue	18
Figure 1.7 : briques en terre cuite	19
Figure 1.8 : extraction et stockage de l'argile	19
Figure 1.9 : Façonnage de la brique	21
Figure 1.10 : séchage de briques	22
Figure 1.11 : Emballage de briques	23
Figure 1.12 : procédé général de fabrication de la brique	24
Figure 1.13 : absorption capillaire a) bétons avec gros granulats de brique, b) bétons avec fins granulats de brique et c) bétons avec gros et fins granulats de brique	29
Figure 1.14 : Sorptivité des mortiers M1B0, M1B10, M1B20, M1B30 et M1B40	30
Figure 1.15 : Sorptivité des mortiers M2B0, M2B10, M2B20, M2B30 et M2B40.....	30
Figure 1.16 : expansion et perte de masse des mortiers contenant des déchets de brique B, D, L et P.....	32
Figure 2.1 : préparation du mortier normalisé	40
Figure 2.2 : Pouzzolanité par essai de chaux saturée.....	42
Figure 2.3 : Appareil flexion-compression.....	44
Figure 2.4 : mesure de la masse volumique à sec.....	45
Figure 2.5 : dispositif de mesure de la capillarité.....	46
Figure 2.6 : Etuve utilisée.....	47

Figure 2.7 : balance hydrostatique.....	49
Figure 2.8 : conservation (l'eau de mer, l'eau potable, l'acide et l'acide sulfurique).....	50
Figure 2.9 : Eprouvettes confectionnées.....	50
Figure 3.1 : Absorption d'eau par capillarité	54
Figure 3.2 : Absorption d'eau par immersion totale	55
Figure 3.3 : Porosité accessible à l'eau	56
Figure 3.4 : Pertes des masses des éprouvettes conservées dans l'eau potable.....	57
Figure 3.5 : Pertes des masses des éprouvettes conservées dans l'eau de mer.....	58
Figure 3.6 : Pertes des masse des éprouvettes conservées dans une solution acide sulfurique (5% H_2SO_4).....	5
9	
Figure 3.6 : Variation des masses pendant la conservation (60jours).....	62

Sommaire

TABLE DES MATIERES

RESUME

ABSTRACT

ملخص

REMERCIEMENTS

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE 1**Partie 1****GENERALITES SUR LA CHEMIE DES CEMENTS**

1.1. Introduction	3
1.2. Procédé de fabrication du ciment	3
1.2.1. Procédé par voie humide	4
1.2.2. Procédé par voie semi-humide	4
1.2.3. Procédé par voie sèche	4
1.2.4. Procédé par voie semi- sèche	5
1.3 Constituants du ciment	5
1.3.1. Le clinker portland	5
1.3.2. Les additions minérales	6
1.3.2.1. Les additions actives	6
- <i>Laitier de haut fourneau</i>	6

- <i>Fumée de silice</i>	6
- <i>Cendres volantes</i>	7
- <i>Sulfate de calcium</i>	7
- <i>Pouzzolane naturelle</i>	7
- <i>Pouzzolane artificielle</i>	8
1.3.2.2. Les additions minérales inertes	8
- <i>Fillers (F)</i>	8
- <i>Schistes calcinés (T)</i>	8
- <i>Calcaires (L)</i>	8
- <i>Constituants mineurs du ciment</i>	9
1.4. Classification du ciment	9
1.4.1. En fonction de leur composition	9
1.4.2. En fonction de leur résistance normale	9
1.5. Hydratation du ciment portland	10
1.5.1. Réaction d'hydratation et propriétés des hydrates	11
1.5.1.1. Hydratation des silicates C_3S et C_2S	11
1.5.1.2. Hydratation de la phase Aluminates	12
1.5.2. L'évolution des propriétés mécaniques du ciment portland	15
1.5.3. Réaction d'hydratation et propriétés des hydrates	15
1.5.3.1. Hydratation des silicates C_3S et C_2S	15
1.6. L'industrie cimentaire en Algérie	15
1.6.1. Secteur public (Groupe Industriel Des Ciments D'Algérie (GICA)	16
1.6.2. Secteur Privée (Groupe LafargeHolcim-Algérie)	16

Partie 2**LES PRODUITS ROUGES ET LA REACTION POUZZOLANIQUE**

1.7 .Introduction	18
1.8. Types de briques	18
1.8.1 Brique en terre crue	18
1.8.2. Brique en terre cuite	18
1.8.3. Procédés de fabrication de la brique	19
1.8.3.1. Extraction	19
1.8.3.2. Préparation de l'argile	20
1.8.3.3. Broyage et malaxage	20
1.8.3.4. Dosage et mélange	20
1.8.3.5. Façonnage	20
1.8.3.6. Séchage	22
1.8.3.7. Cuisson	22
1.8.3.8. Emballage	23
1.8.4. La fabrication de la brique en Algérie	24
1.8.5. Bénéfices de l'utilisation de la brique dans l'industrie du ciment	24
1.8.6. Chimie d'hydratation du ciment avec ajout pouzzolanique	25
1.8.6.1. La réaction pouzzolanique	26
1.8.6.2. Les produits de la réaction pozzolanique	26
1.8.6.3. Caractéristiques de la réaction pouzzolanique	27
1.8.6.4. Méthodes d'activation	27
1.8.6.4.1. Activation thermique	27
1.8.6.4.2. Activation mécanique	27
1.8.6.4.3. Activation chimique	27

1.8.7. Effet de la brique sur la durabilité du béton	28
1.8.7.1. L'absorption d'eau	28
1.8.7.2. La sorptivité	29
1.8.7.3. Expansion	31
1.8.7.4. La résistance à l'attaque des acides	33
1.8.8. Conclusion	34

CHAPITRE 2

MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES UTILISES

2.1. Introduction	36
2.2. Caractérisation des matières premières	36
2.2.1. Le clinker	36
2.2.2. Les déchets de briques	37
2.2.3. Le gypse	38
2.3. Préparation des ciments	38
2.4. Essais effectués	39
2.4.1. Préparation des mortiers normalisés	39
2.4.2. Pouzzolanité du déchet de brique broyé	41
2.4.2.1. Méthode chimique (essai de chaux saturée)	41
2.4.2.2. Essai de résistance mécanique	42
2.4.3. Essais physique	44
2.4.3.1. Masse volumique a l'état frais	44
2.4.3.2. Masse volumique à l'état durci	44
2.4.3.3. Absorption d'eau par capillarité	45
2.4.3.4. Absorption d'eau par immersion totale	47
2.4.3.5. Essai de porosité accessible à l'eau	48
2.5. Durabilité des ciments élaborés	49

CHAPITRE 3

RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Introduction	52
3.2. Essais effectués	52
3.2.1. Etude de la pouzzolanité de la poudre de brique	52
3.2.1.1. Pouzzolanité de la brique déterminée par essais de chaux saturée	52
3.2.1.2. Pouzzolanité de la brique déterminée par essais de résistance mécanique	53
3.2.2. Caractérisation physique	53
3.2.2.1. Masses volumiques à l'état frais et durci	53
3.2.2.2. Absorption d'eau par capillarité	54
3.2.2.3. Absorption d'eau par immersion totale	55
3.2.2.4. Porosité accessible à l'eau	56
3.2.2.5. Durabilité du ciment élaboré	57
CONCLUSION GENERAL	64
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

Introduction Générale

Introduction générale

L'objectif de ce travail de recherche est la caractérisation physique et l'étude de durabilité des nouveaux ciments composés fabriqués par substitution d'une partie du clinker par les déchets de brique rouge finement broyés. Ces déchets de l'industrie des produits rouges se trouvent relativement en abondance en Algérie. Ils représentent entre 10 à 15% de la production nationale qui s'élève, en 2016 à plus de 30 millions de tonnes et restent peu ou pas recyclés jusqu'à présent. Ce nouvel ajout (poudre de brique) n'entre pas dans le champ de la norme en vigueur en Algérie NA 442, mais son utilisation dans l'industrie du ciment présente plusieurs avantages techniques, économiques et environnementaux à savoir :

- Amélioration de la résistance mécanique, l'imperméabilité et la résistance aux attaques chimiques et la résistance à la fissuration d'origine thermique.
- L'ajout est un sous-produit et par conséquent son coût et pratiquement le coût de transport ce qui réduit le prix du ciment et du béton.
- Réduire les émissions du gaz carbonique (CO_2) à effet de serre généré par la fabrication du clinker (la production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique).

Notre travail de recherche vise à étudier la durabilité d'un nouveau ciment composé obtenu par le broyage et l'homogénéisation du clinker, des déchets de brique et du gypse. Le taux de substitution du clinker par la poudre de brique varie de 0 à 30%. La démarche suivie consiste dans un premier temps, à caractériser les matières premières utilisées et dans une seconde étape, on cherchera à évaluer, à partir d'un protocole expérimental détaillé, les différentes performances physiques, mécaniques et de durabilité du nouveau liant.

Le mémoire, construit en trois chapitres. Le premier chapitre est une analyse de la bibliographie sur la chimie des ciments et une synthèse sur l'utilisation des déchets de briques dans la fabrication des bétons. Le deuxième chapitre présente les matières premières et les procédures expérimentales utilisées pour la préparation et la caractérisation des ciments élaborés on se référant à certaines normes Algériennes, Européenne et Américaines.

Le troisième chapitre est consacré aux résultats obtenus et leurs interprétations. Enfin, le manuscrit est clôturé par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus et les perspectives envisagées.

Chapitre 1: Généralités sur les ciments et les ajouts cimentaire

Chapitre 1: GENERALITES SUR LES CIMENTS ET LES AJOUTS CIMENTAIRES

Partie 1

GENERALITES SUR LA CHEMIE DES CIMENTS

1.1. Introduction

Les ciments sont des poudres fines obtenues par la cuisson à haute température (vers 1450°C) et le broyage d'un mélange minérale (calcaire –argile en générale) [1].

Les ciments encore appelés liants hydrauliques, sont des poudres fines chimiques constituées de silicates et d'aluminates de chaux qui s'hydratent en présence d'eau pour donner naissance à un matériau solide, qui conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eaux [2].

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui gâchée avec de l'eau, forme une pate qui fait prise et durcit par suite de réaction et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau [3].

L'industrie des ciments est vite devenue une industrie de masse traitant des quantités énormes de matériaux : de nos jours la production mondiale dépasse largement le milliard de tonnes par année.

Les ciments s'utilisent de plus en plus sous forme de pâte pure, de mortier ou de béton armé ou non .L'ajout d'adjuvent peut modifier certaines de leurs propriétés[2].

1.2. Procédé de fabrication du ciment

Le principe de la fabrication du ciment est le suivant: calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker[4].

Le ciment portland est obtenue par la cuisson des matières premières qui apportent de la chaux CaO, de la silice SiO₂, de l'alumine Al₂ O₃et du fer Fe₂ O₃.

La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires qui contiennent en majorité de calcite CaCO_3 .

La silice, l'oxyde de fer et l'alumine sont présents dans des différents minerais et minéraux comme le sable, les schistes argileux, l'argile et le minerai de fer. Les matières premières (calcaire et argile) sont extraites de carrière, puis concassées, homogénéisées, cuits à haute température, trompées et en fin broyées [5].

Il existe quatre procédés de fabrication des ciments, ces procédés dépend généralement de l'état des matières première (la présence d'eau).

1.2.1. Procédé par voie humide

Les matériaux sont délayés avec de l'eau de façon à obtenir une pâte fluide (28 à 35 % d'eau) ayant une composition chimique convenable et qui sert à alimenter des fours rotatifs. Un four moyen de 150 mètres de long, 4 mètres de diamètre permet une production de 1000 tonnes/jours. Les plus grands en service ont des diamètres de 6 à 7 mètres, des longueurs de 230 mètres et peuvent produire près de 4000 tonnes de clinker par jours .le clinker est refroidi vers 100°C dans des appareils spéciaux et stocké dans des halls [2]

C'est le procédé le plus ancien mais il n'est pas économique car il consomme énormément d'énergie (de l'ordre de 1250 à 1400 Kcal par Kg de clinker produit). Ce procédé tend pratiquement à disparaître actuellement [2].

1.2.2. Procédé par voie semi-humide

C'est une variante du procédé par voie humide, la pâte est essorée par des filtres presses, boudinée, déshydratée, décarbonatée, avant d'être cuite dans les fours rotatifs courts[2].

1.2.3. Procédé par voie sèche

Les roches sont concassées, échantillonnées, déversées dans des halls de pré-homogénéisation de façon à reconstituer une «carrière artificiel ». Elles sont reprises afin d'être transformées en poudre sèche dans des broyeurs sécheurs puis parfaitement homogénéisées par le procédé de fluidification. La poudre obtenue passe ensuite dans des fours le plus souvent constitue de deux parties : une partie verticale (préchauffer) ou elle se décarbonate et arrive ainsi vers 1000°C dans un four rotatif court (60 à 80 mètres de longueur)[2].

Un four de 4 mètres de diamètre et 70 mètres de longueur a une production de 2500 tonnes /jours.il existe des fours capable de produire jusqu'à 8000 tonnes de clinker par jours. Ce

procédé est économique et consomme de l'ordre de 800 à 900 Kcal/Kg de clinker ; soit environ 40% de moins que le procédé par voie humide [2].

1.2.4. Procédé par voie semi- sèche

Il constitue une variation de la voie sèche. La poudre est agglomérée avec de l'eau pour former des granulats qui passent d'abord sur une grille de décarnisation. On peut, avec ce procédé, utiliser des fours droits [2].

1.2. Constituants du ciment

Le ciment est constitué de clinker avec l'ajout d'une quantité de gypse afin de régler la prise, on met les autres constatant au clinker pour améliorer leurs caractéristiques.

1.3.1. Le clinker portland

C'est un produit obtenue par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkérisation) du mélange calcaire-argile. Dosé et homogénéisé et comprenant principalement de la chaux (CaO) de la silice(SiO₂) de l'alumine (Al₂O₃)et de l'oxyde de fer (Fe₂O₃).

Le mélange est en générale constitué à l'aide de produit naturel de carrière (calcaire, argile, marne...).C'est le clinker qui par broyage en présence d'un peu de sulfate de chaux (gypse) jouant le rôle de régulateur. Donne des «Portland» et confère aux ciments de ce groupe leurs propriétés caractéristiques [1].

Le clinker est un produit obtenu par cuisson à haut température d'un mélange de calcaire et d'argile.

Les oxydes se combinent, au début de fusion (clinkérisation), pour forme des silicates et aluminates hydrauliques de chaux [5]:

- le silicate tricalcique (3CaO, SiO₂), noté C₃S et qui représente 50 à 70% du clinker.
- le silicate bicalcique (2CaO, SiO₂) noté C₂S, et qui représente 10 à 30 % du clinker.
- l'aluminate tricalcique (3CaO, Al₂ O₃) noté C₃A, représente 2 à15 % du clinker.
- l'alumine-ferrite tétra calcique ; (4CaO, Al₂ O₃, Fe₂ O₃), noté C₄AF représente 5 à 15 % du clinker.

Selon la norme NA 442[3], le rapport en masse $\left(\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}\right)$, ne doit pas être inférieur à 2.0.La teneur en oxyde de magnésium (MgO) ne doit pas dépasser 5.0%en masse.

1.3.2. Les additions minérales

Les additions sont des matériaux minéraux finement divisés pouvant être partiellement substitués au ciment pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. Les additions peuvent être réactives ou inertes.

1.3.2.1. Les additions actives

a- Laitier de haut fourneau (S)

Le laitier est un sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques. Il est obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau [6].

La composition chimique est représentée dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1 : Composition chimique du laitier de haut fourneau [6].

Elément	Pourcentage (%)
CaO	40 / 50
SiO ₂	26 / 32
Al ₂ O ₃	12 / 20
MgO	2 / 6

La composition du laitier granulé doit être constituée d'au moins deux tiers, en masse, de la somme (CaO, MgO, SiO₂). Le rapport en masse $\frac{CaO+MgO}{SiO_2}$ doit dépasser 1.0.

En Algérie, c'est principalement l'usine sidérurgique d'ElHadjjar (filiale du groupe IdienMittalSteel) qui fournit le laitier granulé aux cimenteries [6].

b-Fumée de silice (F)

C'est un sous-produit des usines de fabrication d'alliages de silicium et de Ferro-silicium obtenue dans un four à arc à partir de quartz de grande pureté et de charbon [7]. Elle est formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de 0.1µm).la fumée de silice dans la fabrication du ciment est formées essentiellement de 85% (en masse) de silice amorphe, sa surface spécifique est supérieure à 15m²/g,et ayant des propriétés pouzzolaniques[4].

c- Cendres volantes (C)

Les cendres volantes sont obtenue par dépoussiérage électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes du courant de gaz des chaudières alimentées au charbon pulvérisé. Les cendres volantes peuvent être de nature silico-alumineuse ou silico-calcaire. Les premières ont des propriétés pouzzolaniques; les dernières peuvent avoir, en plus, des propriétés hydrauliques.

La perte au feu des cendres volantes sèches doit dans tous les cas, être inférieure ou égale à 7% en masse [5].

Les cendres volantes siliceuses (v)

La cendre volante siliceuse est une poudre fine constituée principalement de particules sphériques vitrifiées ayant des propriétés pouzzolaniques. Elle contient essentiellement de la silice SiO_2 réactive et de l'alumine Al_2O_3 . Le restant contient de l'oxyde de fer Fe_2O_3 et d'autres oxydes.

La proportion de chaux réactive CaO est inférieure à 5% en masse. La teneur en silice SiO_2 réactive des cendres volantes siliceuses ne doit pas être inférieure à 25 % en masse [5].

Les cendres volantes calciques (w)

La cendre volante calcique est une poudre fine ayant des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques. Elle contient essentiellement de la chaux réactive CaO , de la silice réactive SiO_2 et de l'alumine Al_2O_3 . Le restant contient de l'oxyde de fer Fe_2O_3 et d'autres oxydes. La proportion de chaux réactive CaO ne doit pas être inférieure à 5% en masse [5].

d- Sulfate de calcium

Le sulfate de calcium doit être ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de fabrication, en vue de réguler la prise.

Le sulfate de calcium peut être du gypse (sulfate de calcium déshydrate, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) de l'hémihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), de l'anhydrite de calcium anhydre (CaSO_4) ou tout mélange de ceux-ci [6].

e- Pouzzolane naturelle

La pouzzolane est une roche naturelle correspondante à des projections volcaniques, essentiellement basiques. Sa couleur est généralement noire ou rouge selon le degré d'oxydation du fer. Elle est composée de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3). La somme des trois oxydes ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) doit être supérieure à 70% selon la norme Américaine ASTM C-618 [8].

f- Pouzzolane artificielle

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets des différentes industries. On distingue: soit des résidus de fabrication industrielle (tel que les mâchefers, cendre de bois ou d'houille), soit des débris de brique et de tuile fabriqués avec des argile pures calcinés à des températures modérées. On distingue aussi le schiste cuit, et les déchets de l'industrie à base duméta kaolinite [9].

1.3.2.2. Les additions minérales inertes

a- Fillers (F)

Ce sont des « constituants secondaires » des ciments, donc ils ne peuvent jamais excéder 5% en masse dans la composition du ciment. Ce sont des matières minérales, naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liant (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau)[6].

b- Schistes calcinés (T)

Ils sont produits dans un four à 800°C, ils contiennent des phases de clinker, des petites quantités de chaux libres (CaO) et des sulfates de calcium, ainsi que des oxydes en quantité plus importantes. Ils ont de fortes propriétés hydrauliques pouzzolaniques.

Les schistes calcinés, finalement broyés, doivent avoir une résistance à la compression d'au moins 25Mpa à 28 jours. Leurs expansion doit être inférieures à 10mm en utilisant un mélange de 30% en masse de schistes calcinés broyés et de 70% en masse de ciment de référence [6]. Les schistes calcinés agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liant (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).

c- Calcaires (L)

Lorsqu'ils sont utilisés dans une proportion excèdent 5% en masse (constituant principal), le calcaire doit satisfaire aux exigences suivantes [9]:

- teneur en calcaire: $\text{CaCO}_3 \geq 75\%$ en masse.
- teneur en argile: Adsorption de bleu de méthylène ≤ 1.20 g/100g.
- teneur en matières organiques: (TOC) $\leq 0.50\%$ en masse.

d-Constituants mineurs du ciment

Les oxydes mineurs les plus importants dans le ciment sont: MgO, Na₂O, K₂O et SO₃.

L’oxyde de magnésium (MgO) provient de la dolomite, souvent présente avec le calcaire. Les oxydes alcalins K₂O et Na₂O proviennent en général, de l’argile et des feldspaths. L’anhydride sulfurique (SO₃) dans le clinker provient de la pyrite (FeS₂), du calcaire ou de l’argile et surtout des combustibles utilisés tels que le charbon, le fuel ou de gaz naturel [9].

1.4. Classification du ciment

1.4.1. En fonction de leur composition

Les ciments sont classés, en fonction de leur composition, en cinq types principaux selon la norme Algérienne NA442. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains. Ils sont regroupés dans le tableau 1.2

Tableau 1.2: Types de ciment et composition [3].

Ciment % en masse	Notation	K	S	D	Z	Cendres volantes		T	L	C.S
						V	W			
Portland	CPA-CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	0 – 5
Portland compose	CPJ-CEM II/A	80 – 94	6 - 20							
	CPJ-CEM II/B	65-79	21 – 35							
De haut fourneau	CHF-CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	0 – 5
	CHF-CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	0 – 5
	CLK-CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	0 – 5
Pouzolanique	CPZ-CEM IV/A	65-90	-	10 - 35		-	-	-	-	0 – 5
	CPZ-CEM IV/B	45-64	-	36-55		-	-	-	-	0 – 5
Au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30		-	-	-	0 – 5
	CLC-CEM V/B	20-39	31-50	-	31-50		-	-	-	0 – 5

1.4.2. En fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours ; des sous-classes «R» sont associées à ces 3 classes principales pour designer des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées classe 32.5, classe 42.5 et classe 52.5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du Tableau 1.3 [3].

Tableau 1.3: Spécification mécaniques et physiques [3].

Classe	Résistance à la compression (MPa)				Retrait à 28 jours ($\mu\text{m/m}$)	Début de prise (min)	Stabilité (mm)
	Au jeune âge		à 28 jours				
	2 Jours	7 Jours	Min	Max			
32,5	-	-	≥ 32.5	≤ 52.5	≤ 800	≥ 90	≤ 10
32,5R	$\geq 13,5$	-					
42,5	≥ 12.5	-	≥ 42.5	≤ 62.5	≤ 1000		
42,5R	≥ 20	-				≥ 60	
52,5	≥ 20	-	≥ 52.5	-	-		
52,5R	≥ 30	-					

1.5. Hydratation du ciment portland

En présence d'eau, les silicates et les aluminates de chaux forment des produits d'hydratations qui donnent avec le temps une masse ferme et dure. Un rôle important est joué par les phénomènes physiques et physico-chimiques accompagnant les réactions chimiques et qui, dans leur ensemble, aboutissent après le gâchage de ciment à la formation d'abord d'une pâte plastique et, ensuite, d'une pierre dure et résistante [9].

Durant la période de malaxage, les différents ions libérés par les différentes phases passent en solution. La dissolution est plutôt rapide et exothermique et les deux hydrates qui réagissent rapidement germinent. La surface des particules de ciment se couvre de silicate de chaux hydraté (C-S-H), formé à partir des ions Ca^{+2} , H_2O , SiO_4^{4-} et OH^- qui proviennent de la phase silicaté de clinker, et d'étringite (trisulfoaluminate de calcium hydraté), formé par une combinaison des ions Ca^{+2} , AlO_2^- , SO_4^{2-} et OH^- , qui proviennent de la phase interstitielle et des différents formes de sulfates de calcium que l'on retrouve dans les ciments. L'accroissement rapide du pH et de la teneur élevée en ions Ca^{+2} dans l'eau de gâchage ralentit le processus de dissolution du clinker et le flux thermique diminue considérablement, mais ne s'arrête jamais. Une plus faible quantité de C-S-H et d'étringite sont formés, mais il n'y a pas de portlandite C-H (période dormante)[10]. Dans la période de prise initiale, la réaction d'hydratation est soudain activée quand la portlandite commence à précipiter. Le flux thermique augmente lentement au début parce que la précipitation de C-H est endothermique et consomme une certaine quantité de chaleur, mais devient plus rapide ultérieurement.

La phase silicatée et les aluminates commencent à développer certaines liaisons interparticulaires qui conduisent à un vieillissement de la pâte [11].

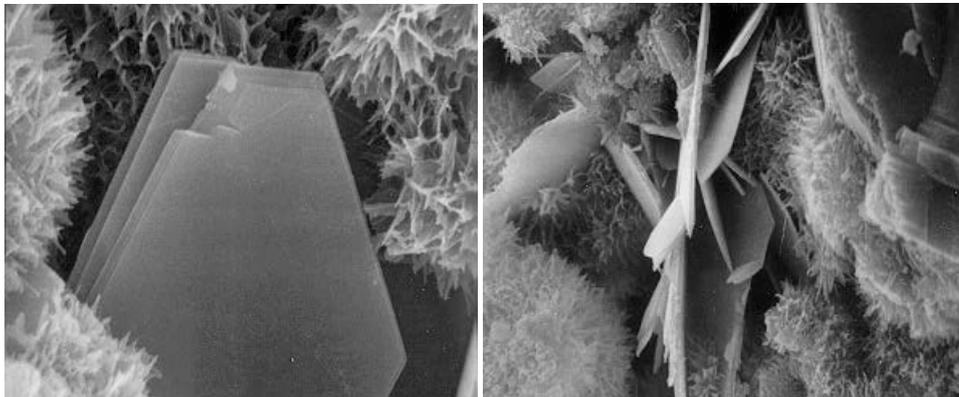
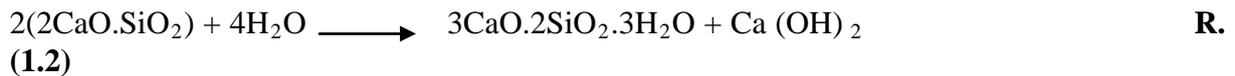
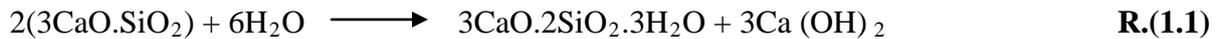
1.5.1. Réaction d'hydratation et propriétés des hydrates

Les quatre phases majoritaires du ciment peuvent être divisées en deux familles: les aluminates (C_3A et C_4AF) et les silicates (C_3S et C_2S). Dans une même famille, l'hydratation des constituants conduit à des produits identiques. Seules les cinétiques des réactions diffèrent. Ce sont ces différentes cinétiques qui sont à l'origine de l'évolution des propriétés mécaniques d'une pâte de ciment à l'échelle macroscopique. Elles permettent le maintien de la maniabilité, la prise puis le durcissement de cette pâte. Hydratation des aluminates Les hydrates issus du C_4AF se déduisent de ceux du C_3A par substitution de l'alumine (Al_2O_3) par l'alumino-ferrite ($Al_2O_3.Fe_2O_3$) dans les formules chimiques. C'est pourquoi, dans cette partie, seule l'hydratation du C_3A est présentée [5].

1.5.1.1. Hydratation des silicates C_3S et C_2S

Lors de l'hydratation du ciment, la réaction chimique des deux silicates avec l'eau produit un gel de silice hydraté : *Le Silicate tricalcique hydraté C-S-H (Tobermorite)*

(C-S-H) et l'hydroxyde de calcium ou portlandite (C-H) selon les réactions [5]



$Ca(OH)_2$ et CSH (SEM 7000 X) Formations fibreuses de CSH (SEM 1100 X)

Figure 1.1 : Pâte de ciment hydratée à 7 jours[12]

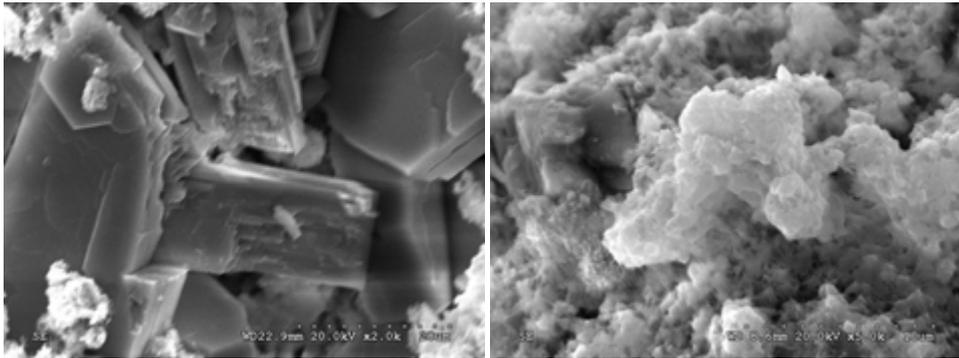


Figure 1.2 : Cristaux de Portlandite [10]

La majeure partie de l'hydratation du C_3S se passe dans les vingt-huit premiers jours suivant le contact avec l'eau. Elle participe à la prise initiale et contribue aux résistances initiale et finale de la pâte. La réaction complète peut prendre jusqu'à une année voire plus [10].

L'hydratation du C_2S est beaucoup plus lente que celle du C_3S . Il participe aux résistances au-delà d'une semaine après le contact avec l'eau. La quantité de portlandite produite est plus faible d'un tiers que dans le cas du C_3S [2].

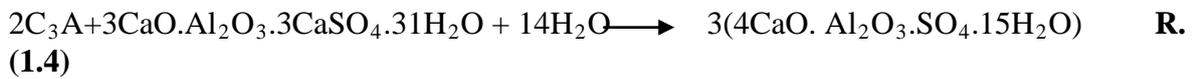
La portlandite est un composé défini et cristallisé (Figures 1.1 et 1.2). Elle cristallise sous la forme de plaquettes hexagonales constituées d'un motif hexagonal en couche [8]. Elle est précipitée à partir de la solution et représente 5 à 15 % du ciment hydraté. D'après Wild et al 1996 [13], le pourcentage de la portlandite est de 28% du poids du ciment complètement hydraté, et comme les réactions ne sont jamais achevées, les mêmes auteurs estiment que la quantité de la portlandite est entre 16 et 20% de la masse du ciment.

Au cours de l'hydratation, elle est enrobée par les autres hydrates, c'est pourquoi sa croissance développe des contraintes internes qui pénalisent la résistance mécanique du matériau. A l'inverse de la portlandite, le C-S-H n'est pas un « composé défini ». C'est le composé majoritaire du ciment hydraté puisqu'il représente 50 à 70 % de sa masse. Il est non stoechiométrique, mal cristallisé et de structure intermédiaire entre les cristaux et les gels (Figures 1.1 et 1.2). Plus de trente phases cristallines de cet hydrate sont connues. Elles sont toutes nommées sous le terme générique de C-S-H [10].

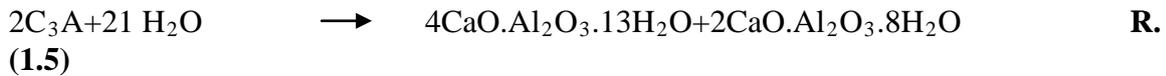
1.5.1.2. Hydratation de la phase Aluminates

L'aluminate tricalcique, produit final d'une série de réactions chimiques lors du processus de calcination, forme également un hydrate, mais il ne contribue que peu à la résistance de la pâte ; de plus, la réaction d'hydratation de ce composé est si rapide qu'elle doit être contrôlée

avec du gypse [9]. En présence de gypse, son hydratation est régulée et conduit à la formation de trisulfoaluminate de calcium hydraté ou d'étringite (Figures 1.3 et 1.4). L'étringite n'est un produit hydraté stable que lorsque le gypse est en quantité suffisante. Or, dans la majorité des cas, le C₃A est en excès par rapport au gypse. C'est pourquoi, quand le gypse est consommé et que le C₃A n'est pas complètement hydraté, l'étringite se transforme en monosulfoaluminatetétracalcique (Figures 1.3 et 1.4). De plus, si après la formation du monosulfoaluminatetétracalcique il reste du C₃A, il se forme des composés de moins en moins riches en sulfate. Selon les réactions suivantes [5] :



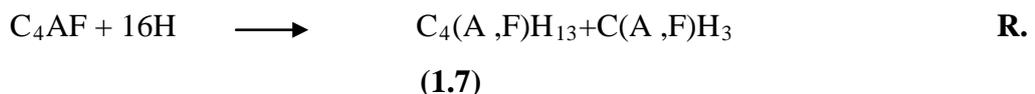
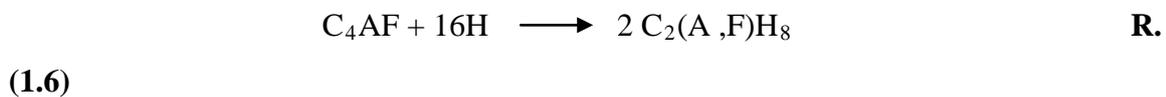
Monosulfoaluminat de calcium hydrates



Aluminates hydratés

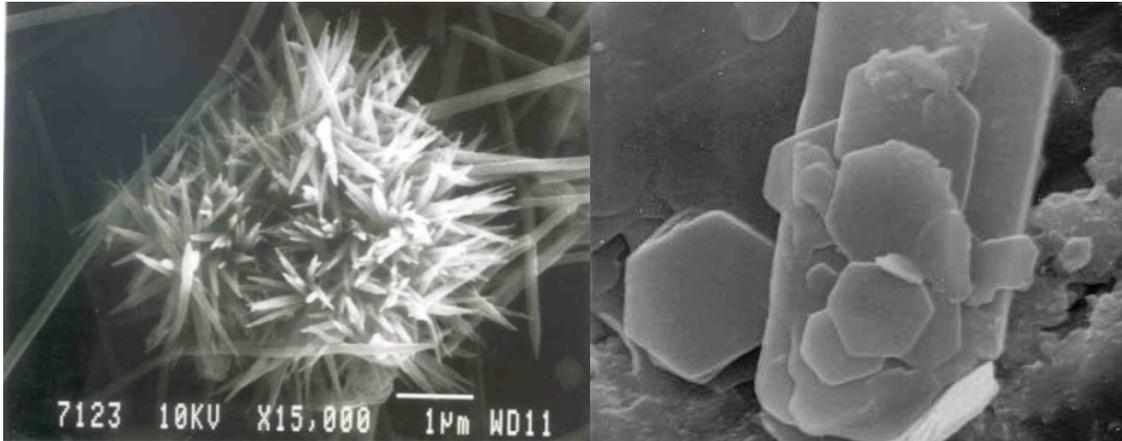
C- Hydratation de la phase ferrique

La phase ferrique C₄AF est en réalité une solution solide, elle adopte le même mécanisme d'hydratation que la phase aluminat C₃A, les réactions sont cependant plus lentes, en présence d'eau, le C₄AF réagit de la manière suivante [9]:



D'abord, il se forme des hydrates hexagonaux (C₂(A, F)H₈ et C₂(A, F)H₁₃ puis d'une phase thermodynamiquement stable C₃(A, F)H₆. En présence de gypse, l'hydratation de C₄AF est

plus efficacement retardée que celle du C₃A. Il ya formation d'intermédiaires analogue à l'étringite et au MonoSulfoAluminate(MSA).



Morphologies aciculaires d'étringite Cristaux de C₄AH₁₃ (SEM 10000 X

Figure 1.3: Morphologies des hydrates (MEB) [12]

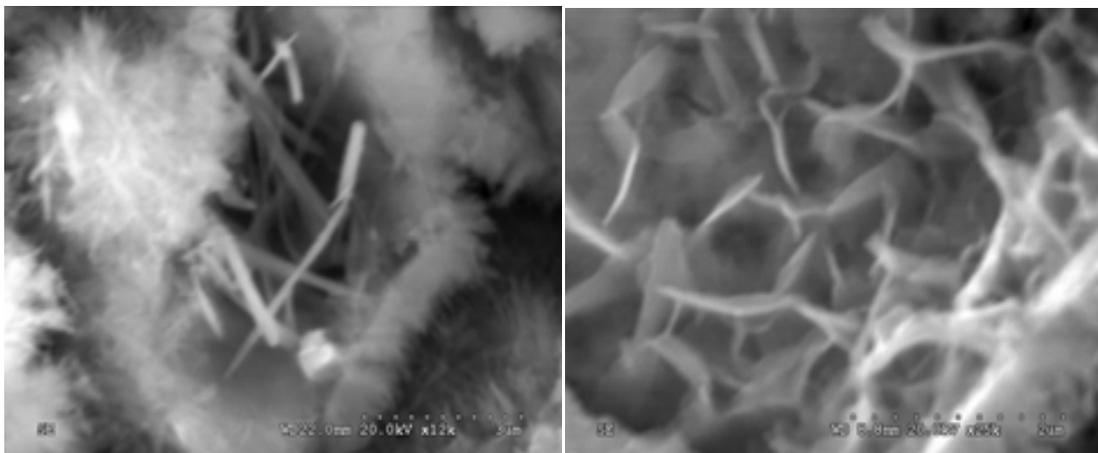


Figure1.4 : Aiguilles d'étringite[10] Figure 1.5 : Monosulfoaluminate[10]

1.5.2. L'évolution des propriétés mécaniques du ciment portland

L'hydratation du ciment portland s'accompagne de la modification des propriétés mécaniques de la pâte. Les propriétés des liants hydrauliques résultent de la superposition de trois types de phénomènes ; un phénomène chimique (l'hydratation), un phénomène physique (la précipitation des solides) et un phénomène mécanique (la prise et le durcissement) [14].

1.5.3. Réaction d'hydratation et propriétés des hydrates

Les quatre phases majoritaires du ciment peuvent être divisées en deux familles: les aluminates (C_3A et C_4AF) et les silicates (C_3S et C_2S). Dans une même famille, l'hydratation des constituants conduit à des produits identiques. Seules les cinétiques des réactions diffèrent. Ce sont ces différentes cinétiques qui sont à l'origine de l'évolution des propriétés mécaniques d'une pâte de ciment à l'échelle macroscopique. Elles permettent le maintien de la maniabilité, la prise puis le durcissement de cette pâte. Hydratation des aluminates Les hydrates issus du C_4AF se déduisent de ceux du C_3A par substitution de l'alumine (Al_2O_3) par l'alumino-ferrite ($Al_2O_3.Fe_2O_3$) dans les formules chimiques. C'est pourquoi, dans cette partie, seule l'hydratation du C_3A est présentée [5].

1.6. L'industrie cimentaire en Algérie

La consommation du ciment est fortement liée au développement local. En Algérie le besoin en ciment a fortement augmenté au cours de ces dernières années conséquence du programme de relance économique et des grands travaux initiés (autoroute est-ouest, des millions de logements avec les structures d'accompagnement, etc.).

La production du ciment en Algérie est actuellement assurée par deux groupes.

1.6.1. Secteur public (Groupe Industriel Des Ciments D'Algérie (GICA))

A l'aube de l'indépendance, le secteur du ciment en Algérie comprenait trois (03) cimenteries, totalisant une capacité productive de l'ordre de 1.5 millions de tonnes. Depuis les années

soixante-dix, la filière ciment, stratégique et indispensable au développement économique et social du pays, a bénéficié d'un grand investissement de la part des pouvoirs publics. Actuellement cette industrie totalise 12 cimenteries publiques, constituées en groupe industriel (GICA), réalisant pour l'année 2016, une production de plus de 12 millions de tonnes par an [15]. Pour combler un déficit constant en matière de ciment, le Groupe industriel des ciments d'Algérie (GICA) projette de produire 20 Mt d'ici 2019 [15], contre 12 Mt actuellement. Aussi, à l'instar des groupes cimentiers internationaux, le groupe GICA a diversifié ses produits en se lançant dans la production des granulats et du béton prêt à l'emploi (BPE).

1.6.2. Secteur Privée (Groupe LafargeHolcim-Algérie)

Le groupe Lafarge-Holcim, leader mondial des matériaux de construction est présent en Algérie depuis 2002. Il compte quatre cimenteries actives. La cimenterie de M'sila (5.5miT/an), la cimenterie de Mascara (3miT/an), la cimenterie de Meftah (1.5miT/an) et la cimenterie de Biskra (2.7miT/an). Il totalise un volume de production de 11.5 millions de tonnes de ciment par an.

Le Tableau suivant expose les capacités de production ainsi que les ajouts utilisés des cimenteries nationales.

Tableau 1.4: cimenteries Algériennes et l'utilisation des ajouts[16, 17]

	Entreprise	Wilaya	Commune	Capacité de production (tonnes)	Ajout utilisé	% d'ajout
Groupe industriel Des Ciments D'Algérie (GICA)	ERCE	Sétif	Ain Elkebira	1.000.000	Pouzzolane	10 à 20
		Batna	Ain touta	1.000.000	Pouzzolane	10 à 20
		Constantine	HammaBouzi iane	1.000.000	Pouzzolane	10 à 15
		Skikda	HadjarSoud	950.000	Laitier	10 à 20
		Tebessa	ElmaaLabiad h	500.000	----	-----
	ERCC	Alger	Rais Hamidou	450.000	Poussière	5 à 10
		Blida	Meftah	1.000.000	Tuf	10 à 15
		Bouira	Sour Elghouzlane	1.000.000	Tuf- Calcaire	10
	ERCO	Ain Temouchen t	Beni Saf	1.200.000	Pouzzolane	10 à 20
		Mascara	Zahana	1.200.000	Pouzzolane	10 à 20
		Saida	Hassasna	500.000	Pouzzolane	10 à 20
	ECDE	Chlef	Oued Sly	2.000.000	Calcaire	10 à 15
		Oum El Bouaghi	Sigus	2.000.000	-	-
Lafarge Algérie	ACC	M'sila	Hammam Edhlaa	4.000.000	Calcaire	10
		Mascara	Oggaz	2.000.000	Pouzzolane	15
		Biskra			-	-

Partie 2

LES PRODUITS ROUGES ET LA REACTION POUZZOLANIQUE

1.7. Introduction

Les briques sont l'un des plus anciens matériaux de construction, ils sont des produits céramiques dont les argiles sont la matière première et parfois des additifs. Les briques ont généralement une forme parallélépipède rectangle. Il existe deux types de briques: briques en terre crue et briques en terre cuite.

1.8. Types de briques

1.8.1 Brique en terre crue

Les briques en terre crue (Figure 2.1) constituent un matériau de base pour la construction de murs et de voûtes. En principe, les briques sont, fabriquées à base de terre (environ 75%), de paille (environ 20%) et d'eau (environ 5%). Le mélange est coulé dans des moules en bois, pour obtenir des briques de $40 \times 20 \times 10 \text{ cm}^3$. Les briques sont séchées à l'air pendant plusieurs jours, avant d'être utilisées [18].



Figure 1.6: brique en terre crue[18]

1.8.2. Brique en terre cuite

Les briques en terre cuite (Figure 2.2) se composent d'argile, d'adjuvants naturels (sable, sciure de bois) et de d'eau. Les composants sont broyés jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène. L'argile est façonnée puis séchée et cuite à une température d'environ 1000°C, pour devenir ce que l'on appelle des briques en terre cuite.

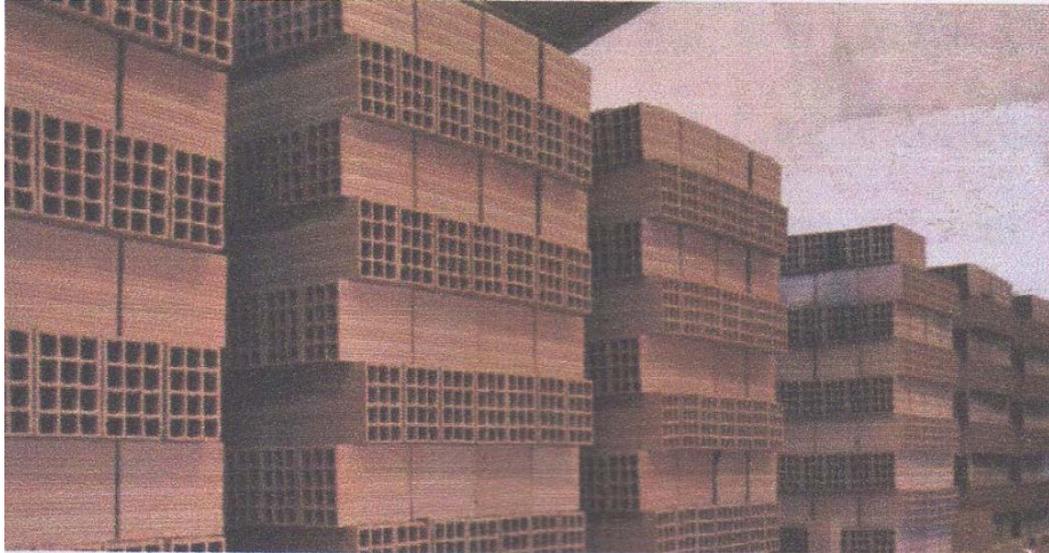


Figure 1.7: briques en terre cuite [18]

1.8.3. Procédés de fabrication de la brique

La production de la brique fonctionne généralement en flux continu et chaque phase génère un stock intermédiaire. Son procédé est représenté comme suit:

1.8.3.1. Extraction

La matière première naturelle de la brique de terre cuite est l'argile. Elle est extraite dans des argilières situées en zone, d'extraction (Figure 2.3). L'argile est omniprésente dans le sous-sol Algérien et ses propriétés diffèrent en fonction de l'origine géologique. Une briqueterie jouxte généralement une argillère. Certaines briqueteries ajoutent des argiles en provenance d'autres argilières afin d'étoffer la gamme de produits. Le transport reste toutefois limité.



Figure 1.8: extraction et stockage de l'argile [19]

1.8.3.2. Préparation de l'argile

La préparation comprend deux opérations principales: le broyage et le malaxage d'une part, le dosage et le mélange des matières premières d'autre part. Le but est d'obtenir une masse argileuse bien homogène et plastique qui sera facilement transformée en produit fini.

1.8.3.3. Broyage et malaxage

Ces opérations ont pour but de rendre la masse d'argile homogène et de lui conférer la plasticité nécessaire au moulage des briques. Cette opération a également pour but de réduire les inclusions solides éventuellement présentes dans l'argile pouvant influencer négativement la structure du produit en terre cuite. Cette étape très importante s'effectue dans des broyeurs mécaniques à meules verticales ou à cylindres horizontaux. Enfin, l'argile contient également des débris organiques nuisibles à la qualité du produit fini, et qui ne peuvent être éliminés que par l'action bactériologique.

A cette fin, l'argile est stockée quelque temps dans un lieu humide et sombre propice au développement de ces bactéries.

1.8.3.4. Dosage et mélange

Aujourd'hui, on ne fabrique plus les briques uniquement à partir des argiles locales, comme c'était le cas auparavant. Pour obtenir une qualité optimale de la matière première, divers types d'argile sont mélangés, toujours sous un contrôle permanent. On peut ainsi garantir la qualité constante des produits en terre cuite. Les adjuvants peuvent influencer les propriétés des produits finis. Ainsi, l'ajout de pigments peut en modifier la couleur; l'ajout de sciure de bois a une influence sur la porosité. La préparation de la matière première s'accompagne

également d'ajout d'eau ou de vapeur. L'ajout d'eau permet de garantir une mise en forme facile de l'argile, tandis que la vapeur augmente la plasticité de l'argile.

1.8.3.5. Façonnage

On distingue divers types de briques, en fonction de la manière dont elles sont mises en forme:

► Briques moulées main

La méthode de moulage la plus ancienne est le façonnage à la main des briques. Le mouleur prend une certaine quantité d'argile, la jette dans un moule en bois préalablement sablé pour éviter que la pâte n'adhère aux parois, presse convenablement la terre pour remplir le moule, arase l'excédent et retourne l'appareil pour démouler la brique crue. Pour faciliter cette opération, l'argile doit être relativement ductile, évitant ainsi au mouleur de devoir exercer un effort trop important. Ceci a pour conséquence que la brique «moulée main» présente une surface irrégulière, caractérisée par des plissures.

► Briques pressées

Les briques moulées à la presse forment une catégorie à part. On introduit dans les moules de l'argile relativement sèche que l'on comprime vigoureusement pour lui donner la cohésion voulue. Ces produits présentent une surface grenue et une forme géométrique bien marquée.

► Briques étirées

Enfin, les briques pour maçonnerie ordinaire sont presque exclusivement fabriquées par extrusion. Dans cette machine, la masse d'argile est extrudée sous forme d'une carotte continue à section rectangulaire. Ce «boudin» d'argile est alors coupé à intervalles réguliers. Chaque élément forme une brique qui présente quatre faces assez lisses suite au coulissement dans la filière, et deux faces de sectionnement plus grossières. L'étireuse permet une production beaucoup plus rapide que n'importe quel autre procédé, et de plus, elle est parfaitement adaptée au façonnage de briques perforées. Ce mode de fabrication est également utilisé pour produire des briques de parement.



Figure 1.9: Façonnage de la brique [19]

1.8.3.6. Séchage

Avant d'être cuites, les briques crues doivent encore perdre une grande partie de leur teneur en eau - du moins en est-il ainsi pour la plupart des argiles. Le séchage se poursuit jusqu'à ce que les briques ne contiennent plus qu'environ 2% d'eau. Le risque serait en effet de les voir se fendre ou éclater sous la dilatation de la vapeur dans la masse. D'autre part, la stabilité dimensionnelle du produit n'est obtenue qu'au terme du retrait consécutif à la dessiccation.

Le séchage s'opère dans des chambres ou des tunnels où il se poursuit de manière régulière et rapide (généralement de 2 à 4 jours). On utilise l'air chaud de la zone de refroidissement du four pour le séchage des briques. La température et le taux d'humidité sont contrôlés tout au long du processus de séchage, au moyen d'un système informatique réglé de façon très précise.



Figure 1.10: séchage de briques [19]

1.8.3.7. Cuisson

C'est la dernière étape que doit subir la brique d'argile façonnée et séchée, avant de pouvoir devenir une brique de terre cuite à proprement parler. C'est une phase d'une grande importance qui doit se dérouler très progressivement. On augmente graduellement la température jusqu'à l'obtention de la température de cuisson (comprise entre 850 et 1200°C, en fonction du type d'argile); on diminue ensuite progressivement la température jusqu'au refroidissement complet. Chaque mélange d'argile se caractérise par sa propre «courbe de cuisson».

On peut modifier l'atmosphère du four. La cuisson en oxydation (= avec apport d'oxygène) est la plus fréquente et produit la teinte «normale». Dans une atmosphère réductrice (= sans apport d'oxygène), on obtient des couleurs plus foncées. Une réduction partielle produit, quant à elle, des teintes fortement nuancées.

Aujourd'hui, on utilise un four continu de type four tunnel. Dans celui-ci, le chargement de briques parcourt un tunnel rectiligne sur des wagonnets et passe successivement par les zones de «préchauffage», de «cuisson» et de «refroidissement». Dans la zone de préchauffage, les briques sont portées progressivement à température. Cet échauffement se fait grâce aux fumées émanant de la zone de cuisson du four. L'humidité résiduelle des briques est ainsi éliminée. A partir d'une température comprise entre 450°C et 600°C, on ralentit la montée en température des produit le «point de quartz»: il s'agit de la température à laquelle la structure cristalline du quartz est modifiée. A cette étape de la cuisson, les briques sont très sensibles à la formation de fissures. La cuisson des briques à proprement parler se fait environ à mi-parcours du four, à une température allant de 1000°C à 1200°C. Le frittage de l'argile se fait à

cette température et se forme alors la structure définitive de la brique. Enfin, une troisième et dernière phase consiste à refroidir les briques. Cette opération doit s'effectuer de façon très contrôlée pour éviter tout risque de fissuration.

1.8.3.8. Emballage

Après la cuisson, les briques sont prêtes à être transportées et livrées sur chantier. Pour des raisons de facilité et de sécurité, elles sont préalablement empilées sur des palettes et emballées de façon à minimiser la quantité d'emballage utilisé.



Figure 1.11: Emballage de briques

En conclusion, le procédé général de fabrication des briques est illustré à travers l'organigramme suivant:

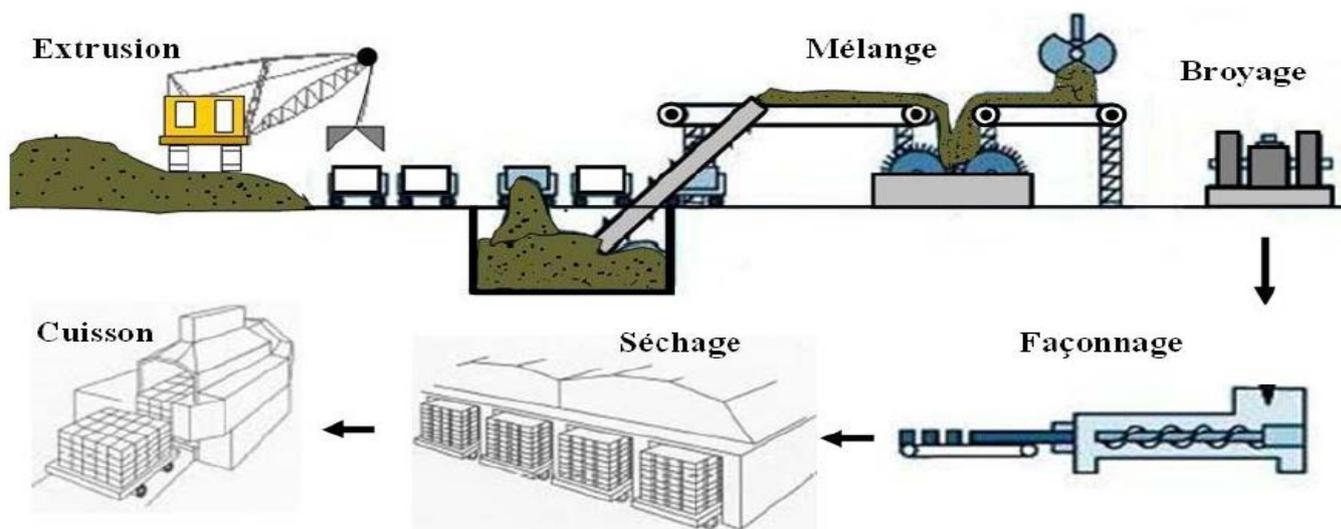


Figure 1.12: procédé général de fabrication de la brique[20]

1.8.4. La fabrication de la brique en Algérie

La production Algérienne des produits rouges qui font partie du secteur des matériaux de construction concerne essentiellement la fabrication de briques à 98% et en quantité plus faible, les tuiles et produits divers. La brique rouge est le matériau de construction le plus utilisé dans la construction des murs en raison de leur facilité d'utilisation; ces bonnes caractéristiques techniques et de leur adaptabilité au climat.

La brique à longtemps été fabriqués selon des méthodes artisanales, l'introduction de fours modernes utilisant l'énergie fossiles (chaleur, fuel, et gaz) et /ou énergie électrique rend leur fabrication facile. La technologie a progressé vers l'automatisation entière du procédé.

1.8.5. Bénéfices de l'utilisation de la brique dans l'industrie du ciment

L'utilisation d'ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques [21].

Intérêt économique de l'addition de la brique au clinker est évident puisque son coût Énergétique est pratiquement nulle, et une économie des coûts de combustible. Le ciment portland est le composant le plus onéreux au cours de la production du béton, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous-produits, et à ce titre, nécessite relativement moins d'énergie, sinon aucune, et sont moins coûteux que le ciment Portland (Mounir, 2008).

Intérêt technique de l'ajout de la brique au clinker réside, en premier lieu, dans le fait

Qu'il permet l'obtention des ciments dont les performances sont aussi bonnes que celles des ciments sans ajouts de même classe de résistance. L'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice).

Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une faible chaleur d'hydratation des ciments composés, les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration.

Intérêt écologique, utilisation d'un sous-produit initialement, sans valeur, diminution de l'émission de CO_2 . La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO_2). En effet, la substitution d'une fraction de clinker permet d'obtenir des ciments aux propriétés mécaniques exploitables, ce qui permet une diminution de rejets de CO_2 . Le taux de substitution de clinker est du même ordre que la diminution de rejet de CO_2 .

Amélioration des propriétés du béton frais et durci (moins de chaleur dégagée, durabilité largement améliorée, la perméabilité du béton est plus faible et résistance en flexion plus élevée).

1.8.6. Chimie d'hydratation du ciment avec ajout pouzzolanique

Les pouzzolanes sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux, qui ne possèdent pas eux-mêmes pas de propriétés liantes mais qui, sous forme finement divisée et en présence d'humidité, réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes. Un matériau est donc dit pouzzolanique si, en présence d'eau, il présente la propriété de se combiner avec la chaux pour former un liant.

1.8.6.1. La réaction pouzzolanique

En général, les ajouts cimentaire avec une teneur élevée en alumine, tendent à avoir des capacités pouzzolaniques plus élevés parce que la formation de (C-A-H) a une demande élevée en CH [16]. La présence de la portlandite (CH) est critique, car le CH n'apporte pas une contribution significative à la résistance du béton et peut être nuisible à sa durabilité. Son élimination par la réaction secondaire avec une pouzzolane peut considérablement augmenter les performances du béton (formation des hydrates analogue a ceux du ciment).

Au cours de l'hydratation du ciment portland il se forme sur chacun des grains une couche de produits d'hydratation qui devient de plus en plus épaisse (d'abord principalement du (C-S-H)), alors que l'hydroxyde de calcium également formé se sépare partiellement de la solution interstitielle, sous forme de cristaux hexagonaux en paillettes. La situation est différente en présence de pouzzolanes, le point de départ des réactions est aussi l'hydratation du clinker de ciment portland, avec la formation de silicate de calcium hydraté (C-S-H) et d'aluminate de calcium hydraté(C-A-H).

Les constituants peuvent se combiner avec la chaux en présence de l'eau pour donner des produits insolubles possédant des propriétés liantes. Garcia. Diaz [22], décrit la réaction pouzzolanique en quatre étapes:

- 1) dissolution par réaction hydroxylique de la pouzzolane en milieu basique. Cette dissolution est assurée par les ions hydroxydes provenant de la dissolution des phases anhydres du ciment ou d'une solution d'hydroxyde de calcium. Elle conduit à la formation d'anions en solution,
- 2) sursaturation de la solution en ions aluminates, silicates et calcium,
- 3) germination et précipitation d'hydrates tels que (C-S-H), (C₂ASH₈).
- 4) croissance des hydrates.

1.8.6.2. Les produits de la réaction pouzzolanique

Les produits de la réaction d'hydratation du ciment contenant la pouzzolane sont [23]:

- ✓ Le silicate de calcium hydraté (C-S-H),
- ✓ L'aluminate tétracalcique hydraté (C₄AH₁₃).

Et, sous certaines conditions :

- ✓ Gehlenite hydratée (C₂ASH₈),
- ✓ Etrangéité (3CaO.Al₂O₃.3CaSO₄.32H₂O).
- ✓ Monosulfo-aluminate (3CaO.Al₂O₃. CaSO₄.12H₂O).

1.8.6.3. Caractéristiques de la réaction pouzzolanique:

- La réaction est lente, le dégagement de chaleur et le développement des résistances seront également lents,
- Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment portland, la réaction pouzzolanique en consomme et améliore la résistance du béton en milieu acide [24],
- Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons par affinage de ces pores capillaires et par transformation des gros cristaux de CH en un produit d'hydratation faiblement cristallisé [25, 26].

1.8.6.4. Méthodes d'activation :

Le ciment avec ajout minéral présente un temps de prise un peu plus long que le ciment ordinaire (CPA-CEM I), surtout dans le cas de bétonnage par temps froid. Cette propriété latente du ciment avec ajout minéral, nécessite l'emploi d'un bon activant.

1.8.6.4.1. Activation thermique

L'activation thermique (accélération des réactions chimiques par l'élévation de la température) consiste à conserver le matériau (éprouvette) dans une étuve à vapeur à différentes températures de cure 20, 40 et 60°C pendant 7 jours. Ensuite, il sera mis dans un bassin d'eau à une température de 20°C jusqu'à la date de l'essai mécanique programmé (généralement 7, 14 et 28 jours).

1.8.6.4.2. Activation mécanique

L'activation mécanique consiste à augmenter la finesse du ciment par broyage poussée. Le broyage a pour but de réduire les éléments en une poudre suffisamment fine afin de rendre la matière plus réactive (plus la surface spécifique est élevée, plus la réactivité chimique est importante). Le broyage est plus facile quand le clinker possède plus de C_3S , moins de C_3A , le plus possible de petits cristaux.

1.8.6.4.3. Activation chimique

Généralement le ciment portland composé est activé par différentes solutions alcalines, en faisant varier la molarité de la solution basique. Les activant chimiques accélérateurs de prise (soude NaOH, potasse KOH) et de durcissement (chlorures de calcium $CaCl_2$) utilisés sont des produits solubles dans l'eau. Ils agissent chimiquement en modifiant les vitesses de

dissolution des constituants anhydres et en accélérant l'hydratation des grains de ciment. La prise est alors plus rapide et s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus important.

Les accélérateurs sont employés pour les bétonnages par temps froid ou lorsqu'un durcissement rapide est souhaité.

1.8.7. Effet de la brique sur la durabilité du béton :

1.8.7.1. L'absorption d'eau

Debieb et al.2008 [27], ont trouvé que les bétons à base de granulats recyclés de brique présentent une grande absorption comparée avec celle des bétons à base de granulats naturels due essentiellement à la grande capillarité de ces bétons par rapport au béton ordinaire. L'essai d'absorption d'eau explique clairement la grande diminution de résistance du béton formulé avec des granulats recyclés qui est due à sa grande porosité et surtout sa large capillarité.

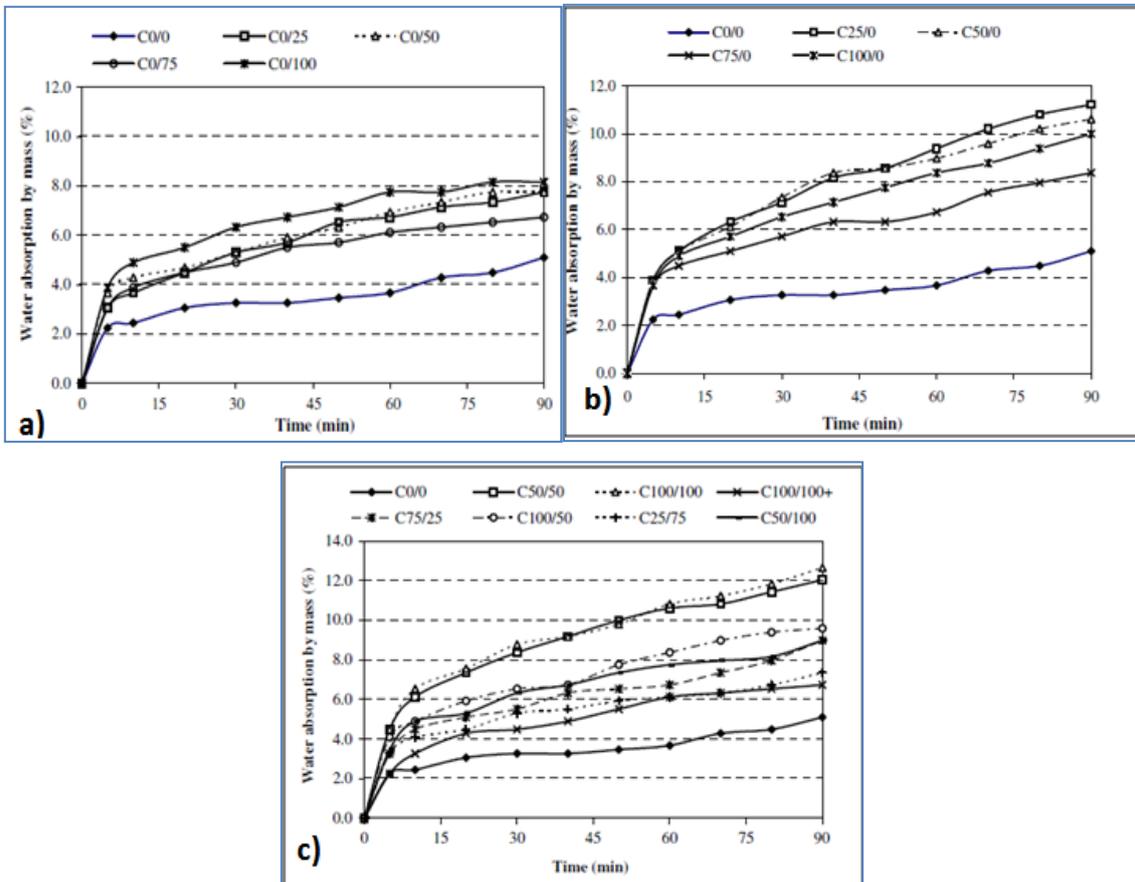


Figure 1.13: absorption capillaire a) bétons avec gros granulat de brique, b) bétons avec fins granulat de brique et c) bétons avec gros et fin granulats de brique[27].

1.8.7.2. La sorptivité

Tolido et al 2007 [28] ont mesuré la sorptivité de deux séries de mortiers confectionnés avec $E/C = 0.4$ et $E/C = 0.5$. Chaque série est préparée avec 0, 10, 20, 30 et 40% de substitution du ciment par la brique broyée. Les auteurs utilisent la méthode de l'eau saturée (technique gravimétrique) Les résultats de cette recherche représentés dans la (Figures 1.18) pour les mortiers préparés avec $E/C=0.4$ et la (Figure1.19) pour les mortiers préparés avec $E/C=0.5$ respectivement, montrent que la sorptivité des deux séries de mortiers diminue avec l'augmentation du taux de substitution.

Cette diminution selon les mêmes auteurs est due à l'affinage des pores de la structure des mélanges contenant la brique. Cet affinage est produit par un effet filler et un effet pouzzolanique de la brique.

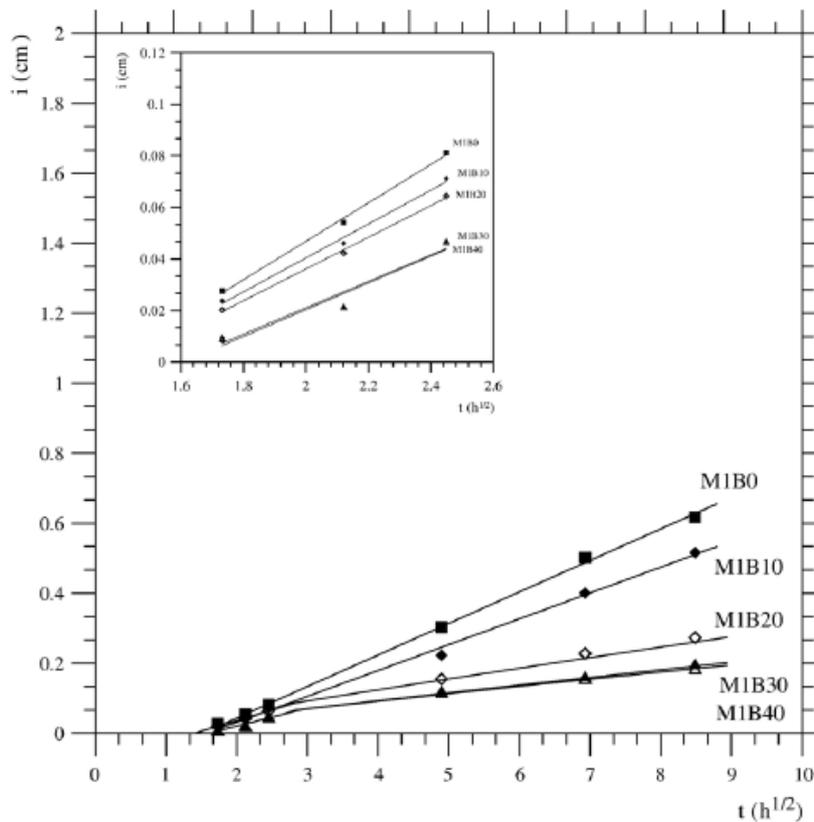


Figure 1.14: Sorptivité des mortiers M1B0, M1B10, M1B20, M1B30 et M1B40[28]

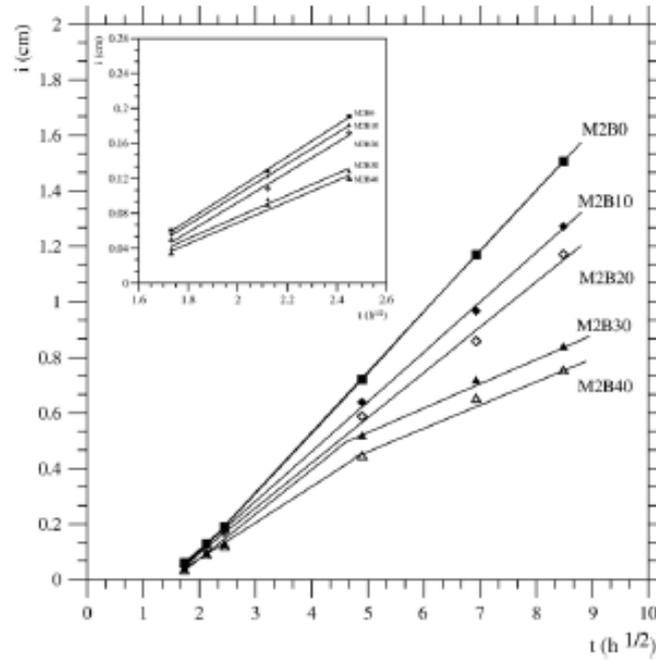


Figure 1.15 Sorptivité des mortiers M2B0, M2B10, M2B20, M2B30 et M2B40[28].

1.8.7.3. Expansion

O Farrell et al. 2000 [29] ont utilisé quatre séries de mortier contenant 0, 10, 20, 30% de déchet de brique, chaque série est formulée de quatre types de brique B, D, L and P. Les auteurs ont suivi l'expansion et la variation de masse des éprouvettes de forme prismatique (4x4x16) cm³ qui ont été placées sous l'eau potable pendant 28 jours et ensuite dans une eau de mer. Les résultats trouvés par ces auteurs sont représentés dans la (Figure 1.20) Les auteurs ont conclu que l'expansion et les pertes de masses des mortiers à base de brique augmentent avec le temps et diminuent avec l'augmentation du pourcentage de brique. La présence de la brique jusqu'à 30% dans les mortiers testés réduit considérablement la perte de résistance par rapport au mortier de référence.

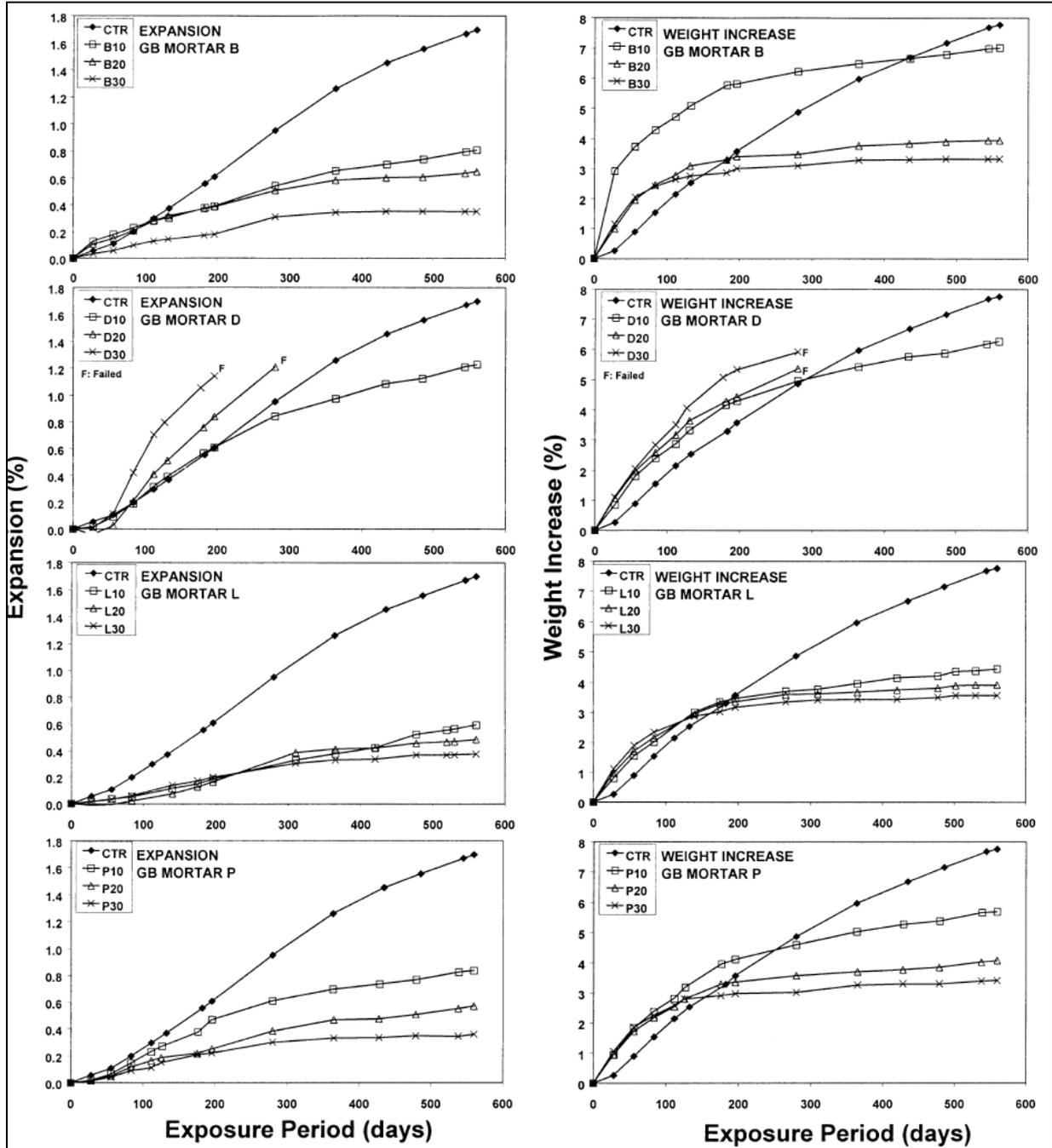


Figure 1.16: expansion et perte de masse des mortiers contenant des déchets de brique B, D, L et P [29]

1.8.7.4. La résistance à l'attaque des acides

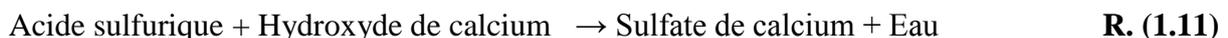
Le mécanisme de dégradation du béton, provient des gradients de concentration entre les eaux agressives (milieu acide) et la solution interstitielle du béton (milieu basique dont le pH est supérieur à 12, riche en calcium) Les principales espèces lixiviés sont les ions calcium et l'hydroxyde. Leurs transport vers le milieu extérieur est donc diffusif. Les milieux acides les plus fréquents sont:

- Les eaux naturelles dans les tourbières et les marécages, ou le pH peut descendre jusqu'à 4;
- Les milieux industriels: dans les industries chimiques ainsi que les industries agroalimentaires.
- Les réseaux d'égouts: l'activité bactérienne conduit au dégagement d'hydrogène sulfuré par la transformation des produits soufrés qui, combiné à l'humidité atmosphérique se condensent sous forme d'acide sulfurique qui va attaquer le béton.
- Les pluies acides, qui contiennent principalement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ayant un pH entre 4 et 4.5, peuvent provoquer de la dégradation de la surface exposée du béton.

L'attaque du béton par l'acide est provoquée par la réaction d'un acide et la partie d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) de la pâte de ciment qui produit un sous-produit de sel de calcium fortement soluble. Ces derniers sont facilement enlevés de la pâte de ciment et affaiblissent la structure de la pâte de ciment et sel du béton. La réaction de base est la suivante :



L'attaque du béton par l'acide sulfurique est le cas le plus agressif et le plus destructif. Le sel de calcium ainsi produit est un sulfate de calcium qui cause alternativement une dégradation accrue selon la réaction suivante:



La dissolution de l'hydroxyde de calcium provoquée par l'attaque de l'acide procède en deux phases. La première phase est la réaction acide-hydroxyde de calcium dans la pâte de ciment. La deuxième phase est la réaction acide- silicate de calcium hydraté, cette phase n'aura lieu que lorsque l'hydroxyde de calcium soit totalement consommé. La dissolution de silicate de calcium hydraté, dans les cas les plus avancés de l'attaque par l'acide peut endommager considérablement le béton.

Tolido et al [28], ont étudié la résistance aux sulfates de magnésium, les échantillons de mortiers sont immergés dans une eau potable jusqu'à 28 jours puis dans une solution de 5% de sulfate de magnésium ($MgSO_4$) pendant 100 et 200 jours. Les résultats de cette recherche montrent que la perte de résistance des mortiers formulés de 10 et 20% de brique est presque la même que celle de mortier de référence après 100 jours d'immersion dans la solution de sulfate de magnésium, cependant après 200 jours d'immersion, les mélanges de brique présentent des pertes de résistances inférieures à celle de référence par exemple: la perte de résistance de l'échantillon de référence (0%) est de 12% alors les échantillons formulés avec 10 et 20% de brique ont une perte de 3 et 5% respectivement. Les auteurs ont expliqué ce phénomène par la réduction de l'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$), par la réduction du C_3A due à la substitution du clinker (le C_3A donne l'étrangéité après hydratation) et par la formation des hydrates additionnels qui réduit la perméabilité et densifie la structure (création des difficultés de pénétration des agents agressifs).

1.8.8. Conclusion

Cette synthèse sur l'utilisation des déchets de briques dans l'élaboration des mortiers et des bétons permet de dégager les constats suivants:

- L'ajout de brique réduit la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec des conséquences très bénéfiques. Il réduit la porosité par densification de la matrice ciment et qui se traduit par une série d'effets très favorables à savoir:
- réduction de la perméabilité à l'eau;
- amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques (protection des armatures contre la corrosion).

Chapitre 2 : Matériaux et procédures expérimentales

Chapitre2 : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES UTILISES

2.1. Introduction

Dans ce deuxième chapitre, nous allons, en premier temps, caractériser les matières premières utilisées pour la fabrication des nouveaux ciments en présentant leurs compositions chimiques, leurs propriétés physiques et la préparation des mélanges et en deuxième temps, en présentera les essais de caractérisation effectués sur les ciments élaborés.

2.2. Caractérisation des matières premières

2.2.1. Le clinker

Le clinker a été fabriqué au niveau de la cimenterie de Hadjar Soud (Wilaya de Skikda) par la technique de la voie sèche. Il est composé de 78.5% de calcaire, 17% d'argile, 3.3% de sable et 1.2% de minerai de fer. Sa composition en oxydes est donnée dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1: Composition chimique du clinker utilisé.

Oxydes	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	CaO _{libre}
(%)	66.81	5.82	2.92	21.56	0.62	0.28	0.68	0.18	1.00

Une fois élaboré, nous avons cherché à déterminer la composition minéralogique potentielle de notre clinker. Nous avons ainsi utilisé les formules de BOGUE[30] qui permettent de calculer avec une bonne approximation, les proportions théoriques des différents composés minéralogiques d'un clinker à partir de sa composition en oxydes. Ces formules sont exprimées par les quatre équations suivantes :

$$C_3S = 4.07C - 7.60S - 6.72A - 1.43F \tag{2.1}$$

$$C_2S = 8.60S + 1.08F + 5.07A - 3.07C \tag{2.2}$$

$$C_3A = 2.65A - 1.69F \tag{2.3}$$

$$C_4AF = 3.04F \tag{2.4}$$

Avec : $A = Al_2O_3$, $F = Fe_2O_3$, $S = SiO_2$, $C = CaO$

On aboutit ainsi à la composition minéralogique représentée dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2: Composition minéralogique du clinker.

C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
60	16	10	9

Ainsi les quatre phases minérales à savoir les silicates tricalciques, les silicates dicalciques, les aluminates tricalciques et les aluminoferritététracalciques représentent environ 95 % de la masse du clinker. Par ailleurs les deux phases silicatées (C_3S , C_2S), qui assurent les propriétés liantes du ciment, sont présentes dans une proportion de 76 %, valeur supérieure au seuil minimal préconisé par la Norme NA 442 [3] qui est de 2/3.

2.2.2. Les déchets de briques

Les déchets de briques sont des sous-produits de l'industrie des produits rouges. Ils se trouvent en grande quantité au niveau national à cause du nombre élevé de briqueteries et des taux de rejets (briques non conformes où cassées) qu'elles génèrent et qui représentent 10 à 15 % de leurs productions [9]. Par ailleurs des études entreprises par S.WILD [31] ont montré un caractère pouzzolanique de ces déchets, raison pour laquelle nous avons décidé de substitué une partie du clinker par ce sous-produit. Nous avons utilisés dans cette recherche des échantillons récupérés auprès de la briqueterie de Bendjerrah (Wilaya de Guelma).

Une fois réceptionnées, les déchets ont fait l'objet d'un broyage, pour les transformer en poudre fine.

Leur composition minéralogique a été déterminée par fluorescence X sur poudre. Les résultats obtenus, présentés en Tableau 2.3, mettent en évidence des pourcentages élevés en silice et en alumine.

Tableau 2.3: Composition chimique des déchets de briques utilisés.

Eléments	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	P.A.F
(%)	4.28	14.17	6.30	69.26	2.25	0.28	1.34	0.02	1.96

D'autres propriétés de l'ajout ont été également évaluées. Ainsi sa masse volumique absolue est de 2.25 g/cm^3 ; sa masse volumique apparente est de 0.71 g/cm^3 ; et enfin son coefficient d'absorption d'eau est égal à 16.1 %.

Selon la norme ASTM C 618 [8], les minéraux provenant de l'argile cuite ayant une somme totale des trois oxydes (SiO_2) + (Al_2O_3) + (Fe_2O_3) supérieure à 70%, dioxyde de sulfure inférieur à 4%, perte au feu inférieur 10% sont des matériaux pozzolanique actifs.

En accordance avec les critères de cette norme les déchets de brique sont un matériau pozzolanique actif pour le béton. (La somme de SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 est de 90%, $\text{SO}_3 < 4\%$ et la P.A.F $< 10\%$).

2.2.3. Le gypse

Pour réguler la prise du ciment, 5% de gypse naturel de la carrière d'Ain M' lila est ajouté au clinker et au brique. Sa composition chimique en oxydes est donnée dans le Tableau 2.4.

Tableau 2.4: Composition chimique du gypse utilisé.

Elément	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	P.A.F
(%)	29.33	6.53	1.11	6.47	2.61	0.00	0.40	35.90	17.50

2.3. Préparation des ciments

La préparation du nouveau ciment est effectuée par un broyage séparé du clinker, des déchets de briques et du gypse. Après dosage et homogénéisation, nous avons élaboré quatre échantillons de ciments composés en faisant varier la proportion des déchets de briques de 0 à 30 %, toute en conservant parallèlement le dosage en gypse à 5 %.

Le Tableau 2.5 regroupe les ciments élaborés et la teneur de chaque constituant. L'utilisation de la brique rouge dans la fabrication du ciment n'entre pas dans le champ de la norme Algérienne du ciment NA442 [3], mais il répond à la démarche environnementale adoptée par les cimentiers pour réduire l'émission des gaz à effet de serre.

Tableau 2.5: Désignation et dosage des ciments élaborés.

Ciment	E0	E10	E20	E30
Clinker (%)	95	85	75	65
Brique (%)	0	10	20	30
Gypse (%)	5	5	5	5

La composition chimique des mélanges réparés déterminée par fluorescence X est représentée dans le Tableau 2.6.

Tableau 2.6: Teneur en oxyde des ciments anhydres (teneur moyenne en masse).

% de brique	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	CaO _{libre}	P.A.F
E0	61.9 2	5.02	3.58	20.17	1.63	0.10	0.68	2.30	2.00	3.02
E10	56.0 3	6.22	4.14	27.01	1.72	0.17	0.75	2.23	2.00	3.28
E20	52.5 3	6.89	4.61	29.02	1.79	0.21	0.82	2.18	1.10	3.06
E30	49.0 2	7.38	4.98	32.01	1.85	0,23	0.92	2.12	1.50	2.70

2.4. Essais effectués

2.4.1. Préparation des mortiers normalisés

Le sable normalisé [un sable naturel, siliceux, le plus quartzeux possible en particulier dans sa partie fine, propre, à grains arrondis et sec, livrée en sacs étanches contenant 1350 g correspondant à la préparation de 3 éprouvettes (4x4x16)cm³ et le ciment à tester sont gâchés avec de l'eau en utilisant les proportions suivantes[5] :

- 450 g ± 2 g de ciment.
- 1350 g ± 5 g de sable normalisé.
- 225 g ± 1 g d'eau potable de robinet.

Le rapport E/C d'un tel mortier est donc 0.50. Avant d'être utilisé pour les différents essais ce mortier est malaxé pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la Norme :

- Introduire l'eau en premier dans le malaxeur, Y verser ensuite le ciment ; aussitôt après, mettre le malaxage en marche à vitesse lente.
- Après 30 s de malaxage introduire régulièrement le sable pendant les 30 s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.
- Arrêter le malaxeur pendant 1 min et 30 s. les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout

Le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.



Figure.2.1 : préparation du mortier normalisé

-Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s. Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le Tableau 2.7

Tableau 2.7 : Malaxage d'un mortier normal.[5]

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment		Introduction du sable		Raclage de la cuve		
Durée			30 s	30 s	30 s	15 s	75 s	60 s
Etat de malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêt		Vitesse rapide

Avec le mortier normal préparé on remplit un moule 4x4x16. Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux couches et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. Le moule est arasé, vibré et recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans la salle ou l'armoire humide. Après 24 h du début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau à $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ jusqu'au moment de l'essai.

2.4.2. Pouzzolanité du déchet de brique broyé

Deux techniques d'analyses et d'essais ont été utilisées dans cette étude pour évaluer l'activité pouzzolanique à différents âges de la poudre de brique.

2.4.2.1. Méthode chimique (essai de chaux saturée)

L'étude des mélanges Chaux hydratée- Pouzzolane est une approche simplifiée de celle de la pâte de ciment, dans laquelle la réaction principale est la fixation, par les pouzzolanes, de la portlandite provenant de l'hydratation du C_3S en produisant de C-S-H secondaires. Le principe d'essai consiste à déterminer la quantité de chaux fixée par le matériau testé dans des conditions très précises, en déterminant la quantité d'hydroxyde de calcium résiduelle après un contact de n jours du matériau avec une solution de chaux.

Le protocole opératoire de cet essai est décrit de la manière suivante [32] :

On pèse à 0.01 g près, 2 g de chaux hydratée et on l'introduit dans une erlen de 1000 ml avec Environ 100 ml d'eau. Après agitation jusqu'à la dissolution complète de la chaux, on met la solution dans un ballon jaugé de 1 litre et on complète le volume avec de l'eau jusqu'à 1000 ml. On Prélève 75 ml de la solution d'hydroxyde de calcium et on l'introduit avec 1 g du matériau (brique traitée mécaniquement par broyage à $90\ \mu\text{m}$) à tester dans une bouteille en polyéthylène bien scellée. La bouteille est mise dans une étuve à 40 °C pendant 2.7 et 28 jours, échéances pour effectuer le test. A chaque échéance on retire la bouteille de l'étuve et on filtre la solution immédiatement sous vide dans une fiole à vide. Cette opération doit être effectuée en moins de 30 secondes pour éviter l'absorption du dioxyde de carbone ambiant et la baisse sensible de température de la solution. On ferme immédiatement la fiole à vide, de manière hermétique, et on laisse refroidir le filtrat à température ambiante. La fiole à vide est secouée pour homogénéiser le filtrat et, au moyen de la pipette, on prélève 15 ml de la solution pour l'introduire dans un bécher de 250 ml.

Après ajuster le pH à (12.5 ± 0.2) avec une solution tampon d'hydroxyde de sodium, on ajoute

Une pincé de l'indicateur Noir d'Eriochrome T (Net). Enfin, on titre la solution avec une de l'EDTA à 0.03 mol/l, jusqu'à ce que la coloration vire du rose au bleu, et qu'une goutte supplémentaire n'augmente plus l'intensité de la coloration bleue. Les résultats obtenus est la concentration des ions calcium de la chaux non fixés sur le matériau pouzzolanique.



Figure 2.2 : Pouzzolanité par essai de chaux saturée.

2.4.2.2. Essai de résistance mécanique

L'essai consiste à étudier les résistances à la flexion et à la compression d'éprouvettes de mortier normal. Dans un tel mortier, la seule variable est la nature du liant hydraulique ; la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du liant utilisé.

Equipements nécessaires

L'ensemble est décrit de manière détaillée par la Norme EN196-1. Il est énuméré ci-dessous.

- Une salle maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 50 %.
- Une chambre ou une armoire humide maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative supérieure 90 %.
- Un malaxeur normalisé.
- Des moules normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée 4 cm x 4 cm et de longueur 16 cm (ces éprouvettes sont appelées éprouvettes (4x4x16)).

- Un appareil à chocs permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en faisant chuter d'une hauteur de 15 mm ±0.3 mm à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s.
- Une machine d'essai de résistance à la flexion et à la compression.

Conduite de l'essai

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

Aux jours prévus, les trois éprouvettes sont rompues en flexion et en compression à 2 jours, 7 jours et 28 jours. Ces âges sont donc impératifs pour vérifier la conformité d'un ciment. Si des essais sont réalisés à d'autres âges, ils devront être réalisés dans les limites de temps indiquées dans le Tableau suivant :

Tableau 2.8: Limite de temps.

Age	24 h	48 h	72 h	7 j	28 j
Précision	± 15 min	± 30 min	± 45 min	± 2 h	± 8 h

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

$$R_f = \frac{1.5.F_f.L}{b^3} \tag{2.5}$$

Cette contrainte est appelée la contrainte à la flexion. Compte tenu des dimensions b et L.

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

$$F_c = \frac{F_c}{b^2} \tag{2.6}$$

Cette contrainte est appelée : contrainte à la compression.



Figure : 2.3: Appareil flexion-compression

2.4.3. Essais physiques

2.4.3.1. Masse volumique a l'état frais

La mesure de la masse volumique à l'état frais est effectuée par remplissage d'un récipient de volume connu par le mortier frais de chaque échantillon. Après les pesées plein (M_1) et vide (M_0) du récipient, nous avons ainsi calculé la masse volumique à l'état frais (ρ_f)

$$\rho_f = \frac{M_1 - M_0}{V} \quad (2.7)$$

2.4.3.2. Masse volumique à l'état durci

La masse volumique du mortier durci (ρ) est déterminée pour les différents mortiers confectionnés, conformément à la norme européenne NF EN 12390-7 [33]. la procédure suivie est la suivante [34]:

- Peser la masse d'une éprouvette ($4 \times 4 \times 16$) cm^3 durci M après passage à l'étuve à 70°C (jusqu'à masse constante), dans notre cas, les éprouvettes utilisées ont subi une cure dans l'eau potable pendant 28 jours.
- Une fois la masse constante obtenue, une mesure des dimensions des éprouvettes avec un pied à coulisse est effectuée pour déterminer son volume.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2.8)$$

Une autre méthode peut être utilisée pour la mesure de la masse volumique du mortier, il s'agit de peser le lot des 3 éprouvettes de mortier dans l'air (m_1) puis dans l'eau (m_2). La différence ($m_1 - m_2$) représente la masse du volume d'eau déplacé (v) : si (ρ_e) est la masse volumique de l'eau, la masse volumique des éprouvettes est :

$$\rho = \rho_e \frac{m_1}{m_1 - m_2} \quad (2.9)$$



Figure 2.4: mesure de la masse volumique à sec

2.4.3.3. Absorption d'eau par capillarité

L'absorption par capillarité est le phénomène physique susceptible de faire pénétrer des substances agressives extérieures à l'intérieur du mortier et béton. C'est aussi une propriété qui caractérise la disposition des pores du matériau qui absorbent et transmettent l'eau par capillarité. Il est utilisé en complément à d'autres essais pour caractériser la durabilité du béton et du mortier.

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

Conduite de l'essai

Après démoulage, les éprouvettes prismatiques de mortier ($4 \times 4 \times 16$) cm^3 sont conservées jusqu'à l'âge de 28 jours dans l'eau (deux échantillon par composition). Les éprouvettes sont

ensuite extraites de l'eau, puis conservées dans une étuve ventilée à 60°C. Durant cette période, le suivi de la masse est réalisé à intervalle de temps régulier jusqu' à une masse constante. Les éprouvettes sont ensuite préalablement imperméabilisées par la résine sur les quatre faces latérales (4x16). Après le séchage complet de la résine, les éprouvettes sont posés sur des petits supports (non absorbants) dans un bac à eau de telle manière que seuls les 5 premiers millimètres de la surface (4x4) de l'éprouvette soient immergés dans l'eau afin d'obtenir un écoulement unidirectionnel, le bac d'eau muni d'un système d'alimentation automatique en eau permet de maintenir le niveau d'eau constant tout le long de l'expérience(voir la Figure 2.5).

L'essai d'absorption capillaire a été réalisé conformément au mode opératoire de la norme européenne NF EN 480-5 [35] et consiste à déterminer la quantité d'eau absorbée par le mortier en fonction du temps. Le taux d'absorption par remontée capillaire due à la force de succion d'une éprouvette. Puis on procède à de relevés de masse successifs à l'aide d'une balance de précision de 0,01g sur des intervalles de temps très courts au début puis de plus en plus espacés au fur et à mesure que l'on avance dans l'expérience (5,10,15,20, 30, 1h, 2h, 3h, 1J, 2J , 3J.)À chaque échéance, les éprouvettes sont sorties du récipient, essuyées à l'aide d'une éponge humide, pesées puis replacées dans le récipient.

Pour une échéance donnée, l'absorption capillaire « CA » est exprimée en grammes par millimètre carré (g/mm²), par la formule suivante :

$$CA = \frac{M_j - M_o}{S} \quad (2.10)$$

Avec

M_o : masse sèche de l'éprouvette avant immersion dans l'eau en gramme.

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

S : section de la base de l'éprouvette en millimètre carré, c'est-à-dire 1600mm².



Figure 2.5 : dispositif de mesure de la capillarité

2.4.3.4. Absorption d'eau par immersion totale

L'absorption d'eau par immersion d'un mortier est déterminée selon la prescription de la norme NBN B15-215 :1989 [36].

Cet essai a été effectué afin d'avoir une idée sur la porosité interne du matériau, en déterminant la masse d'eau que peut absorber les éprouvettes après immersion totale durant une période donnée.

Rappelons que l'essai consiste à un charge des éprouvettes ($4 \times 4 \times 16$) cm³ du mortier jusqu'à masse sèche constante dans une étuve ventilée dont la température est maintenue à 150°C. Ensuite l'immersion totale des éprouvettes dans un bac à eau à 20 ± 2 °C durant un minimum de 48h et jusqu'à saturation du matériau. Avant la pesée l'éprouvette est essuyée avec une éponge humide de manière à la débarrasser de son eau superficielle. La masse est considérée constante lorsque deux pesées successives à 24h d'intervalle ne donnent pas une différence supérieure à 0.1%. Une fois la masse saturée obtenue et la masse à sec préalablement connue, nous avons déterminé la masse d'eau absorbée.

L'absorption d'eau par immersion A_b est exprimée en % de la masse sèche et est calculée par la relation suivante :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2.11)$$

M_a : masse de l'échantillon imbibé d'eau.

M_s : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C.

Les résultats obtenus sur 3 éprouvettes de chaque type de mortier sont exprimés, en pourcentage, sous la forme de la moyenne de 3 valeurs mesurées.



Figure 2.6: Etuve utilisée.

2.4.3.5. Essai de porosité accessible à l'eau

La porosité accessible a été mesurée par pesée hydrostatique, suivant la norme NF EN18-459 [37]. Les mesures ont été effectuées après conservation des éprouvettes ($4 \times 4 \times 16$) cm³ dans l'eau à température ambiante jusqu'à l'échéance de 28 jours. Cette mesure simple, praticable sur une large variété de pâtes de ciment, mortiers ou bétons, est considérée comme un paramètre de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité. C'est en effet un indicateur de la qualité du matériau. Elle est calculée grâce à la différence de masse entre un échantillon à l'état saturé.

Cette méthode (pesée hydrostatique) présentée dans la Figure 2.7 étant certainement la plus simple parmi toutes celles permettant d'accéder aux différents indicateurs de durabilité, les spécifications proposées sont préférentiellement basées sur la porosité à l'eau. L'essai comprend les étapes suivantes [34] :

1. Pesée hydrostatique

Cette pesée s'effectue en immergeant complètement l'éprouvette à l'aide d'une balance hydrostatique (précision 0.01g) pour obtenir M_{eau} de l'éprouvette immergée dans l'eau.

2. Pesée à l'air

Après la pesée à l'eau, il faut essuyer rapidement superficiellement l'éprouvette avec un chiffon sec sans toutefois retirer l'eau des pores. Ensuite peser immédiatement l'éprouvette à l'air à 0.01 g près. On obtient de cette manière, la masse M_{air} de l'éprouvette imbibée. Pour mieux caractériser un mortier, l'essai est réalisé sur 3 échantillons.

3. Pesée à sec

S'effectue par étuvage de l'échantillon à une température de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à stabilisation de la masse, c'est-à-dire lorsque deux pesées consécutives espacées de 24 heures ne diffèrent pas de plus de 0.05%. La masse ainsi déterminée est la masse de l'éprouvette sèche M_{sec} . On utilise la formule suivante pour calculer la porosité accessible à l'eau P :

$$P = \frac{(M_{\text{air}} - M_{\text{sec}})}{(M_{\text{air}} - M_{\text{eau}})} \quad (2.12)$$



Figure 2.7 : balance hydrostatique

2.5. Durabilité des ciments élaborés

Les mortiers et les bétons peuvent être plus ou moins altérés ou même désagrégés par des influences diverses. Une des principales est l'action des eaux dites « agressives ». Le but de cette partie est de déterminer la durabilité des ciments élaborés sous l'effet de nombreux milieux de conservation, on a choisi le milieu marin, un milieu acide et pour la comparaison, on a conservé les mêmes échantillons dans une eau potable.

Pour avoir l'effet du milieu agressif sur nos échantillons, on a conservé des éprouvettes des mortiers normal de 28 jours d'âge dans trois milieux différents : le premier est une eau de

robinet, le deuxième est une eau de mer et le troisième est un milieu acide jusqu'au l'âge de 90 jours.



Figure2.8: conservation (l'eau de mer, l'eau potable, l'acide et l'acide sulfurique)



Figure2.9 : Eprouvettes confectionnées.

Chapitre 3 : Résultats et discussions

CHAPITRE 3

RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Introduction

Nous présentons dans le présent chapitre, les différents résultats obtenus et aussi les interprétations des différents phénomènes mécaniques, physiques et de durabilité qui apparaissent dans ce travail de recherche.

3.2. Essais effectués

3.2.1. Etude de la pouzzolanité de la poudre de brique

L'objectif de notre étude est d'évaluer l'activité pouzzolanique des déchets de brique en utilisant différentes méthodes: le test de la chaux saturée (essai chimique) et par l'essai mécaniques sur des éprouvettes de mortier.

3.2.1.1. Pouzzolanité de la brique déterminée par essais de chaux saturée

La réactivité pouzzolanique, déterminée par le test de chaux saturée, est indiquée par le pourcentage des ions Ca^{2+} de la chaux fixées par la silice et/ou l'alumine des déchets industriels utilisés.

Les volumes de l'EDTA du dosage des ions calcium non fixés sur la poudre de brique à 7, 14, 21 et 28 jours sont donnés dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1. Volume de l'EDTA du dosage des ions calcium dans les solutions préparées

	Volume EDTA (mm) à 7 jours	Volume EDTA (mm) à 14 jours	Volume EDTA (mm) à 21 jours	Volume EDTA (mm) à 28 jours
Brique	3.5	2.9	2.1	1.9

Selon les résultats obtenus, le volume moyen de l'EDTA du dosage des ions calcium non fixés sur la brique est très faible et diminue avec le temps (Tableau 3.1), ce qui montre que la consommation des ions calcium Ca^{2+} de la portlandite par la poudre de brique est très importante et témoigne donc la pouzzolanité déferée de la poudre de brique.

3.2.1.2. Pouzzolanité de la brique déterminée par essais de résistance mécanique

Cette méthode est basée sur la détermination des résistances mécaniques des mortiers normalisés de ciments renfermant les pouzzolanes. Le comportement mécanique de tous les Ciments élaborés a été étudié en flexion simple (3 points) et en compression sur des éprouvettes prismatiques ($40 \times 40 \times 160$) mm³. Les essais mécaniques ont été effectués à 90 jours de durcissement sur des mortiers de ciments composés de 0 à 30% de déchet de brique. Deux échantillons sont testés en flexion simple ensuite les quatre morceaux d'éprouvettes obtenus après rupture sont alors soumis à une compression. Les résultats de cet essai sont regroupés dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2. : Résistance mécanique des mortiers de ciments élaborés.

	E0	E10	E20	E30
Résistance à la compression à 90 j (MPa)	53.90	56.20	56.70	57.90
Résistance à la flexion à 90 j (MPa)	7.99	8.43	9.03	9.25

D'après le Tableau 3.2 on remarque que les résistances des ciments conservés pendant une longue période (90 jours) présentent des valeurs de résistance plus importantes que celle du ciment portland sans ajout. Cette augmentation de résistance est probablement due à la formation prolongée du gel $C - S - H$ secondaire qui résulte de l'interaction de la phase amorphe contenue dans la brique avec la portlandite $C_a(OH)_2$. Ces résultats sont similaires des résultats de littérature [9].

3.2.2. Caractérisation physique

3.2.2.1. Masses volumiques à l'état frais et durci

Les mesures expérimentales des masses volumiques à l'état frais et durci des mortiers de ciments élaborés sont reportées dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3: Masses volumiques des ciments élaborés

➤ Pourcentage de brique (%)	E0	E10	E20	E30
Masses volumiques sèches (g/cm^3)	2.152	2.070	2.012	2.063
Masses volumiques à l'état frais (g/cm^3)	2.337	2.272	2.278	2.298

D’après les résultats du Tableau 3.3, on remarque une diminution quasi-linéaire des masses volumiques des ciments en fonction de la teneur en briques. Les baisses constatées, variant entre 0.96 et 0.95% par rapport au mortier témoin, s’expliquent aisément par le fait que la masse volumique de l’ajout utilisé, à savoir les déchets de briques, est nettement plus faible que celle du clinker.

3.2.2.2. Absorption d’eau par capillarité

Tableau 3.4 : Résultat d’Absorption d’eau par Capillarité.

	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	1 h	2h	3 h	1j	2j	3j
E₀	553.93	554.83	555.18	555.46	555.59	556.00	556.74	557.87	558.31	562.78	564.61	565.3
E₁₀	541.61	542.76	543.15	543.5	543.84	544.29	545.38	547.06	547.38	554.16	556.13	558.55
E₂₀	534.65	535.74	536.15	536.48	536.74	537.15	543.01	539.55	539.95	546.00	549.14	550.83
E₃₀	536.86	538.02	538.38	538.52	538.93	539.36	540.23	541.68	542.39	548.57	551.73	553.61

La Figure 3.1 : représente la variation des mesures des masses des éprouvettes normalisées en fonction de la racine carrée du temps.

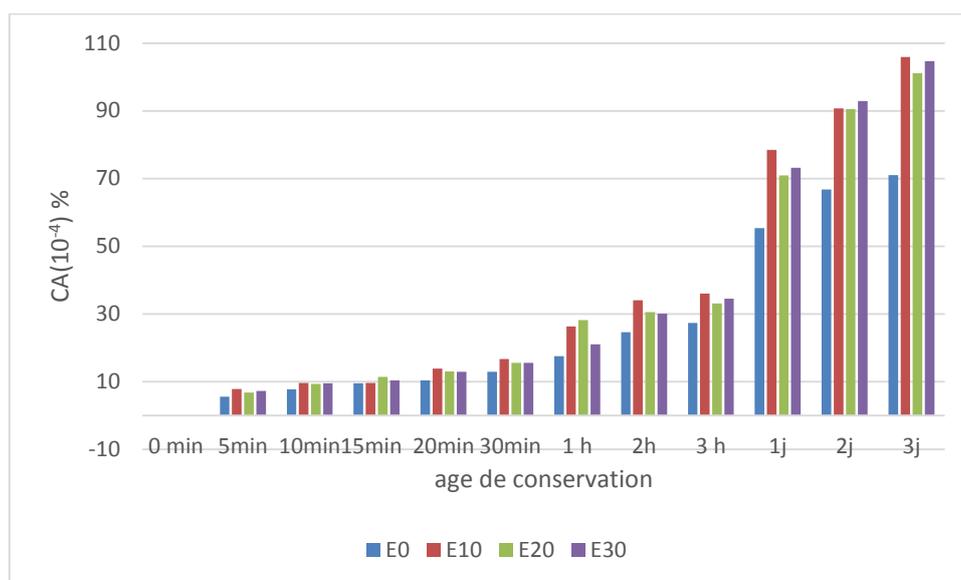


Figure 3.1 : Absorption d’eau par capillarité

D'après la Figure 3.1, on constate que l'absorption d'eau par capillarité des mortiers augmente en fonction du temps et en fonction de l'augmentation du taux de substitution.

3.2.2.3. Absorption d'eau par immersion totale

Après séchage jusqu'à masse constante puis émergence des éprouvette dans l'eau pendant 48h on a obtenu les pesés suivantes représentées dans le Tableau 3.5 :

Tableau 3.5: Résultats d'absorption d'eau par immersion totale.

	E ₀	E ₁₀	E ₂₀	E ₃₀
M _a	595.63	583.68	574.79	581.32
M _s	548.35	533.67	523.83	530.22
A _b (%)	8.62	9.37	9.72	9.63

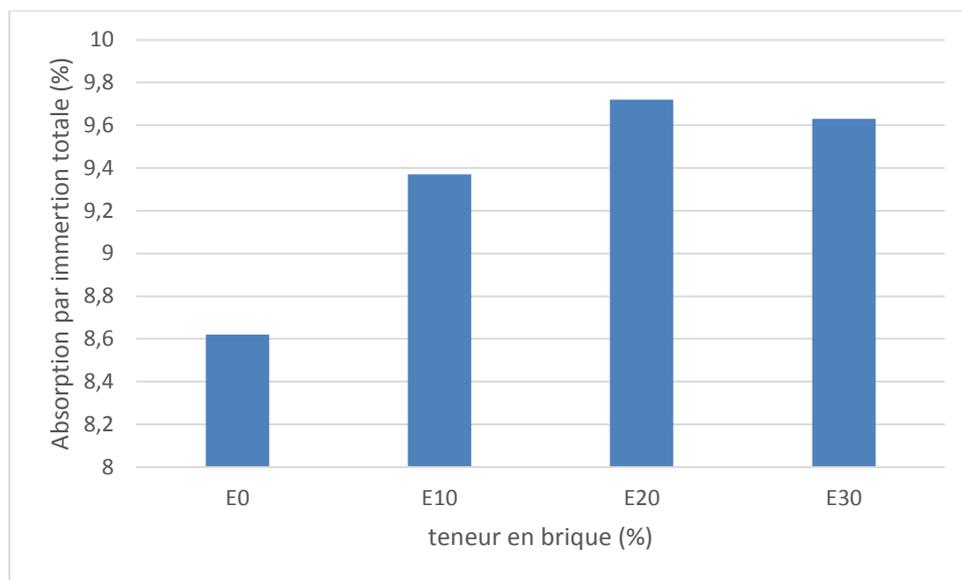


Figure 3.2 : Absorption d'eau par immersion totale.

On remarque d'après le Tableau 3.5 et la Figure 3.2 que l'absorption d'eau par immersion totale augmente avec l'augmentation de la substitution du clinker par les déchets de brique broyés. Cette augmentation représente 1.08, 1.12 et 1.11% respectivement par-rapport-à l'absorption d'eau du mortier de référence contenant 0% d'ajout. Cette croissance est due à la forte capacité d'absorption d'eau de la brique (16.1% [9]). Des résultats similaires ont été retrouvés dans la littérature [38].

3.2.2.4. Porosité accessible à l'eau

Les résultats de l'essai de mesure de la porosité accessible à l'eau réalisés sur des éprouvettes de mortier normalisé confectionnées avec ciment contenant, 0, 10, 20 et 30 % de déchet de brique sont illustrés dans le Tableau 3.6 :

Tableau 3.6 : Résultat de Porosité accessible à l'eau.

	$M_{\text{Sous l'eau}}$	$M_{\text{à l'air}}$	M_{seche}	P (%)
E ₀	329.866	596.36	548.35	0.18
E ₁₀	320	584.166	533.67	0.19
E ₂₀	314.433	574.666	523.83	0.20
E ₃₀	316.566	581.3	530.22	0.19

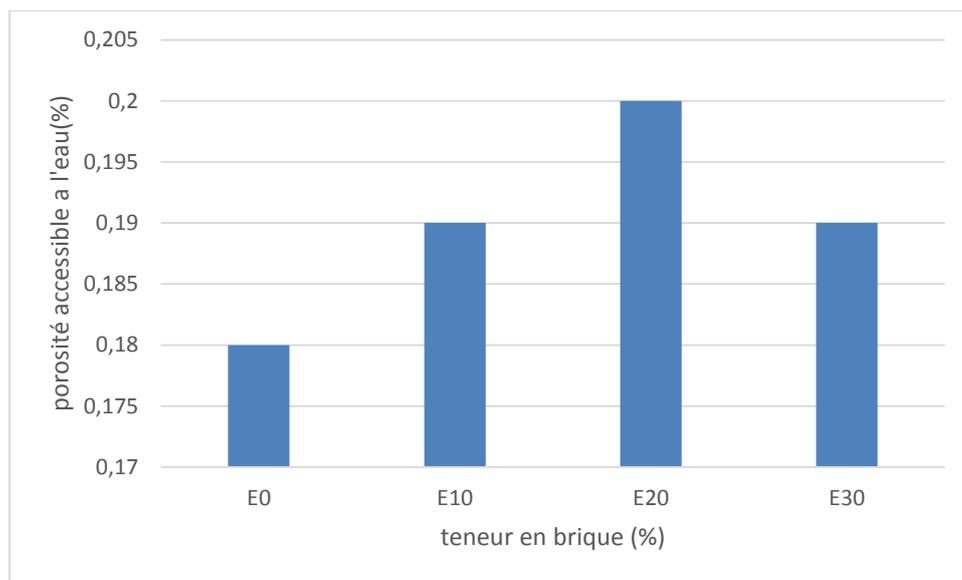


Figure 3.3 : Porosité accessible à l'eau.

Il ressort de l'examen de la Figure 3.3 et du Tableau 3.6 que : la porosité accessible à l'eau obtenue par des pesés hydrostatiques des éprouvettes confectionnées avec des ciments contenant 10, 20 et 30% de poudre de brique augmente légèrement et représente 1.05, 1.11 et 1.05% respectivement par rapport à la porosité du mortier de référence E₀. Bien que cela puisse sembler contradictoire. En raison de l'effet positif de la poudre de brique sur la compacité des mortiers et des bétons (effet filler et pouzzolanique de la poudre de brique [9]).

3.2.2.5. Durabilité du ciment élaboré

La durabilité du nouveau ciment élaboré est évaluée par la mesure des pertes de masse des éprouvettes confectionnées avec mortier normal. Ces éprouvette ont été démoulées après 24 h et conservé pendant 28 jours dans l'eau potable à la température ambiante.

Après 28 jours de cure sous l'eau. Les éprouvettes sont pesées pour déterminer la masse initiale M_0 puis 03 éprouvettes de chaque échantillon sont immergées pendant une durée de 60 jours dans une solution acide contenant 5% d'acide sulfurique (H_2SO_4), dans l'eau de mer et pour faire la comparaison 3 autres éprouvettes sont conservées dans l'eau potable. A chaque échéance, les éprouvettes sont extraites des solutions puis elles sont pesées.

Conservation dans l'eau potable

Les mesures de la variation en masses sont regroupées dans le Tableau 3.7 et les pertes de masses sont illustrées sur la Figure 3.4.

Tableau 3.7: Variation des masses en (g) des éprouvettes conservées dans l'eau potable.

Durée Echantillon	M0	1j	2j	3j	7j	14j	21j	28j	60j
E0	582.90	583.58	583.15	583.29	583.42	585.00	585.00	585.78	596.82
E10	580.85	580.91	580.97	580.93	584.02	584.27	582.28	582.59	593.14
E20	591.81	591.88	591.86	591.82	592.06	593.16	593.16	593.32	601.00
E30	568.79	568.85	568.87	568.86	569.08	570.05	569.81	570.21	587.46

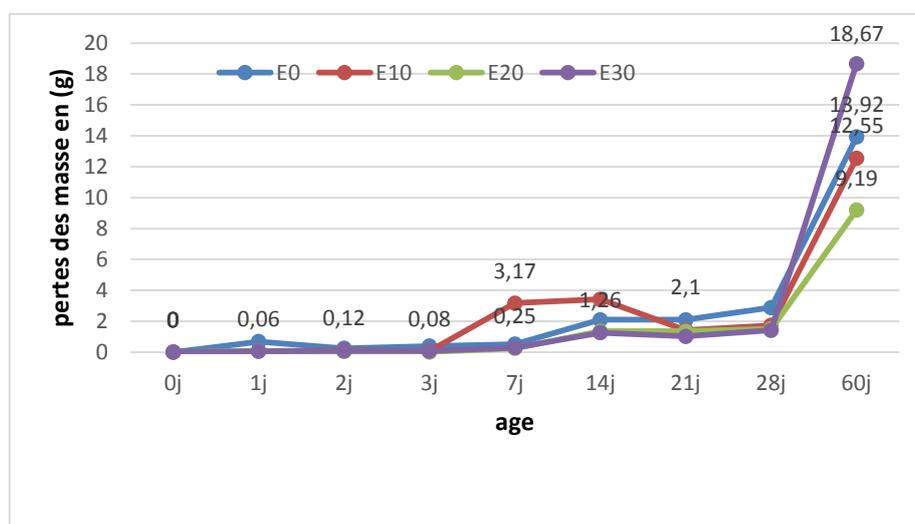


Figure 3.4 : Pertes des masses des éprouvettes conservées dans l'eau potable.

D’après le Tableau 3.7 et la Figure 3.4, on constate une augmentation logique de la masse de toutes les éprouvettes confectionnées en fonction du temps. Les échantillons E10 et E20 présentent une augmentation plus faible par rapport au mortier de référence (E0) tandis que l’échantillon E30 présente une valeur supérieure à ce dernier.

Conservation dans l’eau de mer

L’eau de mer contient les sels suivant selon [29] : NaCl (30g /l) du chlorure de magnésium Mg Cl₂ (6.0g/l) du carbonate du potacium CaSO₄ (1.5g /l), du MgSO₄ (5g /l) et CaSO₄ 1.5g /l).

Tableau 3.8 : Variation des masses en (g) des éprouvettes conservées dans l’eau de mer.

Durée Echantillon	M0	1j	2j	3j	7j	14j	21j	28j	60j
E0	587.36	588.14	588.15	588.21	588.95	590.18	591.43	592.10	591.91
E10	588.47	585.20	584.84	584.99	585.59	586.62	588.47	592.47	593.46
E20	572.00	572.76	572.56	575.01	575.54	574.16	577.08	576.05	595.90
E30	585.99	586.44	586.35	586.47	586.99	591.02	595.91	589.31	593.74

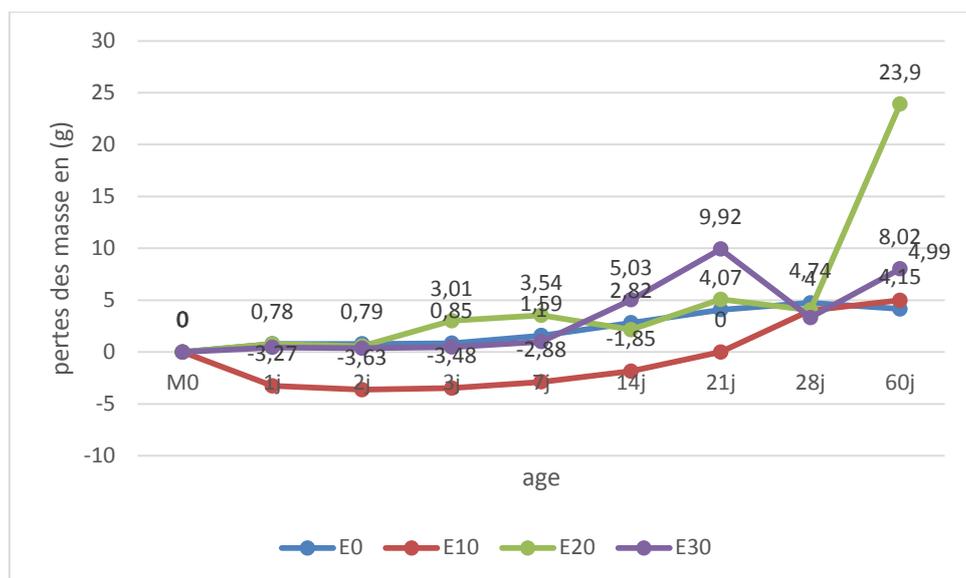


Figure 3.5 : Pertes des masses des éprouvettes conservées dans l’eau de mer.

D’après le Tableau 3.8 et la Figure 3.5, on constate qu’il y a une augmentation de masse des échantillons E0, E20, et E30, alors que l’échantillon E10 présente des pertes de masses

jusqu'à 21 jours de conservation puis il présente des faibles augmentations de masses jusqu'à 60 jours. Ces augmentations sont dues l'absorption d'eau par les éprouvettes.

Conservation dans l'acide sulfurique.

Le Tableau 3.8 représente la variation des masses des mortiers en fonction du taux de substitution et en fonction du temps.

Tableau 3.9 : Variation des masses en (g) des éprouvettes conservées dans l'acide sulfurique.

Durée Echantillon	M0	1j	2j	3j	7j	14j	21j	28j	60j
E0	581.72	584.39	584.05	576.60	559.94	524.48	444.17	409.98	147.88
E10	581.72	586.96	584.32	580.69	570.92	527.58	443.47	399.24	151.38
E20	599.22	593.70	591.86	591.48	590.98	559.76	480.83	431.82	181.03
E30	572.96	577.43	576.40	578.06	577.96	565.58	549.39	509.78	292.95

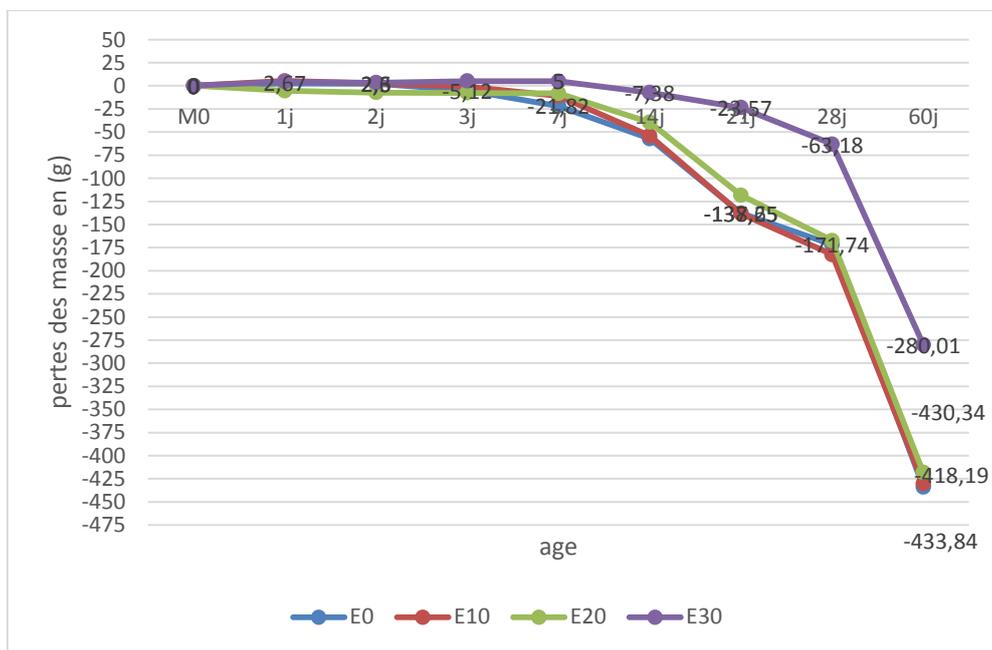


Figure 3.6 : Pertes des masse des éprouvettes conservées dans une solution acide sulfurique (5% H_2So_4).

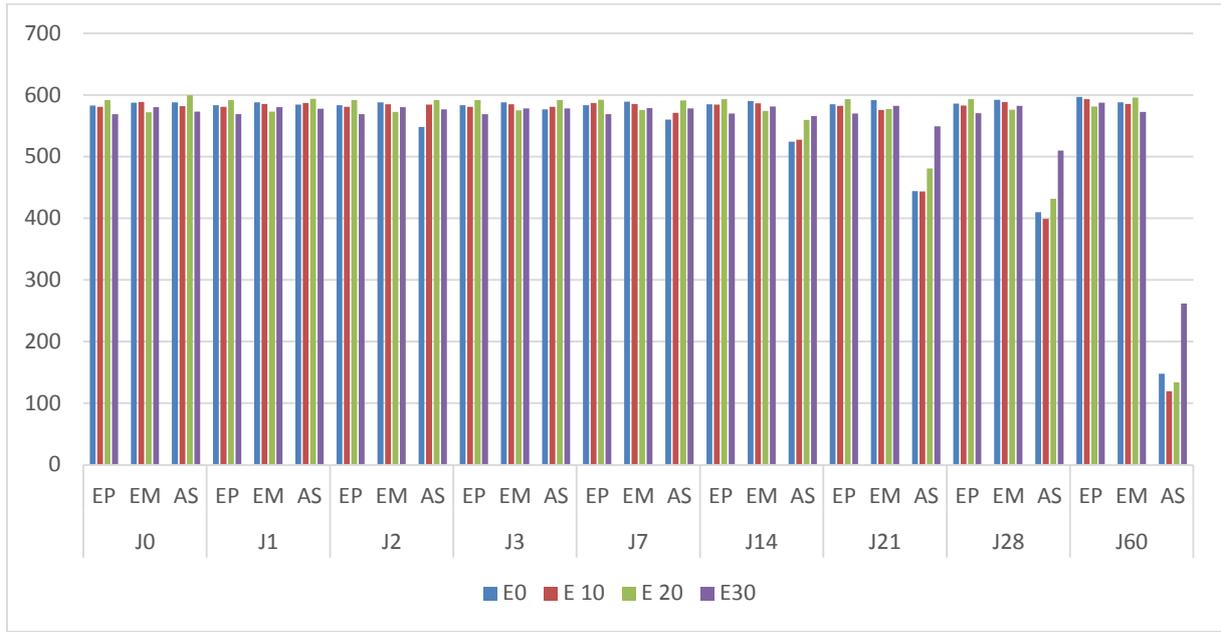
D'après Tableau 3.9 et la Figure 3.6 On remarque que les pertes de masses sont observées à partir du 3^{ème} jour pour les échantillons E 0, E10et E20. Ces pertes en masses des deux échantillons E 10et E20 sont presque similaire que celles de l'échantillon E0. Tanis que pour

l'échantillon E30 la perte de masse est enregistrée à partir de 14^{ème} jour de conservation. En générale, les éprouvettes confectionnées avec des mortiers contenant la poudre de brique ont présentées des pertes de masses plus faibles que celles de l'échantillon E0. Les pertes mesurées après 60 jours de conservation dans l'acide sont 74.5, 73.9, 69.7 et 48.8% des échantillons E0, E10, E20, E30 respectivement. Ce comportement est expliqué par l'effet pozzolanique de la poudre de brique (fixation de la portlandite Ca(OH)_2 par les silice et l'alumine actif de la brique).

A la fin de ce chapitre, on représente un bilan des résultats obtenus de l'ensemble des essais de durabilité réalisés. Signalons toute fois qu'une prolongation de la durée de conservation est nécessaire pour mieux comprendre et évaluer l'effet de la poudre de brique sur la durabilité de notre ciment.

Tableau 3.10 : Comparaison entre les éprouvettes conservées.

		0J	1J	2J	3J	7J	14J	21J	28J	60J
E ₀	Aau potable	582.90	583.58	583.15	583.29	583.42	585.00	585.00	585.78	596.82
	Eau de mer	587.36	588.14	588.15	588.21	588.95	590.18	591.43	592.10	587.95
	Acide sulfurique	581.72	584.39	584.05	576.60	559.94	524.48	444.17	409.98	147.88
E ₁₀	Eau potable	580.85	580.61	580.57	580.83	587.02	584.27	582.28	582.59	593.14
	Eau de mer	588.47	585.20	584.84	584.99	585.59	586.62	575.48	588.45	585.17
	Acide sulfurique	581.72	586.96	584.32	580.69	570.92	527.58	443.47	399.24	119.59
E ₂₀	Eau potable	591.81	591.68	591.66	591.82	592.06	593.16	593.16	593.32	581.12
	Eau de mer	572.00	572.76	572.56	575.01	575.54	574.16	577.08	576.05	595.90
	Acide sulfurique	599.22	593.70	591.86	591.48	590.98	559.76	480.83	431.82	134.09
E ₃₀	Eau potable	568.79	568.75	568.57	568.76	569.08	570.05	569.81	570.21	587.46
	Eau de mer	579.96	580.37	579.98	577.94	578.49	581.43	582.34	582.35	572.65
	Acide sulfurique	572.96	577.43	576.40	578.06	577.96	565.58	549.39	509.78	261.94



Conclusions Générale

CONCLUSIONS GENERALES

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au laboratoire de génie civil et hydraulique de l'université 8 Mai 1945, Guelma.

L'objectif visé dans cette étude est de valoriser un sous produit de l'industrie des produits rouges. Il entre dans le cadre de la valorisation et le recyclage des matériaux locaux. Il consiste à substituer le clinker, fabriqué à la cimenterie Hadjar soud (wilaya de Skikda) par les déchets de brique finement broyés collectés près de la briqueterie de Bendjerrah (wilaya de Guelma) pour la fabrication d'un nouveau ciment composé. Le taux de substitution choisi varie de 10 à 30% et pour faire la comparaison, nous avons préparé un échantillon de référence qui contient 0% d'ajout. Après une série d'essais de caractérisation chimique, physique, mécanique et de durabilité référencier selon les normes Algériennes, Européenne et Américaines sur les liants hydrauliques, nous avons tiré les conclusions suivantes:

1. Les masses volumiques des mortiers élaborés avec les nouveaux ciments composés sont plus faibles que celles de l'échantillon de référence, ce qui peut être un avantage pour les structures lourdes.
2. Une augmentation de la porosité accessible à l'eau ainsi que de la l'absorption d'eau par capillarité mesurées à un âge de 28 jours des éprouvettes confectionnées avec ajout de brique par rapport à l'échantillon de référence. Cette augmentation est expliquée par une croissance de porosité totale du fait que la réaction pouzzolanique n'est pas encore prédominante (effet prolongé de la pouzzolane).
3. L'incorporation de la brique finement broyée dans le ciment à légèrement améliorer les performances de durabilité et qu'une prolongation de la durée de cure est nécessaire pour mieux comprendre l'effet de la brique sur la durabilité du mortier.

En perspective, nous allons allonger la durée de cure des éprouvettes et aller jusqu'à une année et plus et de compléter le travail par une étude de la microstructure dont le but est de bien étudier la réaction pouzzolanique de la poudre de brique et son influence sur les performances de durabilité des ciments, des mortiers et des bétons.

Références bibliographique

Références Bibliographiques :

- [1] Georges Dreux .Nouveau Guide de Béton. Eyrolles 1979. Paris.
- [2] Cherait Y. Nafa Z. Elément de matériaux de construction et essais. Université 8 mai 1945. Guelma. 2007.
- [3] Norme Algérienne. NA 442. Liants hydraulique, ciments courants : composition spécification et critères de conformité 2^{ème} édition. IANOR. Alger. 200.
- [4] Dupain. R .Lanchon. R .CsaintArroman. J .Granulats , sols , Ciments et Bétons. castillas Paris.
- [5] Nigri G. Etude de l'influence des ajouts minéraux sur la qualité et les propriétés du ciment. Mémoire de magister. Génie civil. Mécanique des matériaux. Sols et structure. Université 8 mai 1945. Guelma. 2005.
- [6] Momene S. Athamnia G. Ciment et cimenteries en Algérie. Production et normalisation. Mémoire de master. Génie civil. Conception et calcul de construction. Université 8 mai 1945. Guelma. 2013.
- [7] Adam N. Propriétés de Béton. Ayrolle. 2000. Paris.
- [8] American Society for Testing and Materials. ASTM C-618 Specification for Fly ash and raw or Calcined natural Pozzolan for use as mineral admixture in Portland cement concrete. American Society for Testing and Materials. 1998.
- [9] Nigri. G. Nouvelle élaboration d'un liant hydraulique. Thèse de doctorat. Université 08 Mai 45. Guelma. Algérie. 2018.
- [10] Goto. T. Influence des paramètres moléculaires du latex sur l'hydratation. La rhéologie et les propriétés mécaniques des composites ciment/latex. Thèse de doctorat. L'université paris vi - pierre et marie curie. Paris vi. France. 2006.
- [11] Pierre Claude. A. Bétons Haute Performance. Édition Eyrolles. 2001.

- [12] Defosse. C. Chimie du ciment Valorisation des déchets en cimenterie. Université libre de Bruxelles. 2004. site "CHIM 315" Partie 3. 2004.
- [13] Wild. S. Khatib. JM. Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars. *Cement and concrete research*. 27.1.1996. 137-146.
- [14] Delair. S. Etude de l'atténuation des efflorescences sur les matériaux cimentaires au moyen des produits pouzzolaniques. Thèse de doctorat. Ecole supérieure de Saint-Étienne. France. 2008.
- [15] Belahmed. M. La Nouvelle norme du ciment NA 442/2013 et la durabilité. Bulletin d'information trimestriel du Centre d'études et de Services technologiques des Matériaux de construction. N°21. Juin 2017.
- [16] Mansour. M.S. Influence du Métakaolin sur le comportement rhéologique et mécanique des bétons à haute performance. Thèse de doctorat. Université de Blida. Algérie. 2010.
- [17] www.schs.dz, consulté le 23 Novembre 2017.
- [18] Bourmate. N. Granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques. Thèse de Doctorat. Université des frères Mentouri de Constantine. 2017.
- [19] Fédération Belge de la brique. www.brique.be.
- [20] <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/1789> visite le cite 17.06.2018
- [21] Bouglada. M. S. Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier. MEMOIRE de Magister. Université de M'sila. 2008.
- [22] Garcia-Diaz. E. Réactivité pouzzolanique des métakaolinites: Corrélations entre les caractéristiques minéralo-géologique des kaolins. Thèse de doctorat de l'école des Mines de St Etienne. 1995.
- [23] Morsy. M. S. Alsayed. S.H. Salloum. Y. A. Development of eco-friendly binder using -fly ash-lime-anhydrous gypsum. *Construction and Building Materials*. 35. 2012. 772-777.
DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.142
- [24] Sabir. B. B. Wild. S. and Bai. J. Metakaolin and Calcined Clays as Pozzolans for Concrete. *A Review. Cement and Concrete Composite*. 23. 2001. 441-454.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5).

- [25] O'Farrell. M.Sabir. B. B. Wild. S. Strength and chemical resistance of mortars containing brick manufacturing clays subjected to different treatments. *Cement and Concrete Composite*. 28 (2006) 790-799.DOI:10.1016/j.cemconcomp.2006.05.014
- [26] Samet. B.Mnif. T. Chaabouni. M. Use of kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements. Formulation of blended cement. *Cement and Concrete Composite*. 29. 2007.741-749.
- [27] Debieb. F. Kenai S. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete.*Construction and Building Materials* 22. 2008. 886–893
- [28] TolidoFilho. RD.Gonçalves JP., Americano BB, Fairbairn EM R. Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil, *Cement and Concrete Research* 37. 2007. 1357-1365.
- [29].O'Farrell .M., Wild S., Sabir B., Resistance to chemical attack of ground brick. PC mortar Part II. Synthetic seawater. *Cement and Concrete Research* 30 (2000) 757-765
- [30] Baron. J.Ollevier. JP. Les bétons bases et données pour leur formulation.Editions Eyrolles. Paris. 1997.
- [31] Wild. S. Khatib. J . M. O'Farrell, M. Sulphate resistance of mortar containing ground clay brick calcined at different temperatures. *Cement and Concrete Research*.28. 1. 83-92.1998.
- [32] Bouhmid. M. Elaboration d'un eco-ciment pouzzolaniquea base de vase de barrage hydraulique traitée et déchet de brique de construction. Mémoire de Magister.Université des sciences et de la technologie Mohamed.Boudiaf.Oran. 2011.
- [33] NF EN 12390-7. Essaipour béton durci-7: masse volumique du béton. 2012.
- [34] Boukour. S. Caractéristiques physic-chimiques et durabilité des éco-composites cimentaires à base de granulats de caoutchouc issue de pneus usagés. Université 8 Mai 45. Guelma. Algérie. 2017.
- [35] NF EN 480-5. Adjuvants pour béton, Mortier et coulis- Méthodes d'essai partie 5. Détermination de l'absorption capillaire. 2006.

[36] NBN B15215. Essais des bétons: absorption d'eau par immersion. 1989.

[37] NF EN 18-459. Béton- Essai pour béton durci: essai de porosité et de masse volumique.2010.

[38] Poon. C.S. Chan. D. Paving blocks made with recycled concret aggregate and crushed clay brick. *Construction and building materials.*, 20(08):569-577.2006.