

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20 Août 1955-SKIKKA

Faculté de Technologie

Département : Génie civil



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة

كلية التكنولوجيا

قسم الهندسة المدنية

MÉMOIRE

Présenté

A

L'UNIVERSITÉ 20 AOÛT 1955 SKIKDA

Pour obtenir le titre de

MASTER

Spécialité

GÉNIE CIVIL

Option

MATÉRIAUX EN GÉNIE CIVIL

Par

BEDOUI IKHLAS

Thème

VALORISATION DES DECHETS DANS LES MATERIAUX CIMENTAIRES

Soutenu le: **29/06/2024**

Devant le jury composé de:

Présidente	Mouats Wassila	MCA	Université de Skikda
Encadreur	Abdelouahed Assia	MCA	Université de Skikda
Co-Encadreur	Hebhoub Houria	Pr	Université de Skikda
Examineur	Boughamsa Wassila	MCA	Université de Skikda

Promotion: 2023-2024

REMERCIEMENTS

من قال انا لها نالها ونحن لها او ان ابت رغما عنها اتينا به

و ها نحن ليوم نعانقها

aujourd'hui

Nous remercions dieu tout puissant qui nous a donné le puvoir, le courage et

la patience pour l'élaboration de ce modeste travail .Nous remerciment les plus vifs

sincères vont à nos chère parents poure leur soutien permanent

On tient à remercier chalezsement notre encadrante pour l'aider qu'il nous

a offert madame le professeur « Hebhoub Houria » ainsi que les conseils et

les orientations valeureuses pour le temps précieux qu'il nous a consacré,

pour son encouragement durant l'élaboration de ce mémoire. Nous

remercions également aux membre de jury qui ont accepté d'examiner notre travail et de

l'enrichir par leur proposition

Nous remercion toute l'équipe du laboratoire du département de HJAR SOUD « GICA » toute

nos enseignants du département de génie civil, nous remerciment à tous ceux qui ont

contribué de prés ou de loins à la réalisation de ce travail

Résumé

Le recyclage des déchets de brique rouge mis en jeux deux grands volets, économique et environnemental, réduire le prix de revient tout en préservant la nature par les tonnages élevés de déchets encombrants qu'on peut récupérer.

Par ce travail expérimental nous avons essayé de contribuer à la valorisation des déchets de brique rouge et voir la possibilité de son réintroduction dans la fabrication du ciment comme ajout cimentaire.

Afin d'atteindre notre objectif nous avons procédé à la récupération de ces déchets disponibles et l'utilisé comme fillers remplace partiellement un ciment CEMI.

Pour réaliser se travail nous avons introduit les fillers de brique recyclés avec des taux de substitution de 8, 16 et 24% et étudié les propriétés sur pates a l'état frais(demande en eau, prise et stabilité) et les performances mécaniques sur mortier a l'état durci (résistance en compression et en traction par flexion avant et après traitement thermique a 50 à400°C) et nous avons également étudié les paramètres de durabilité à savoir (l'absorption d'eau par immersion et capillaire, porosité accessible à l'eau, variations dimensionnelles et attaques chimiques par les acides et les bases) ensuite comparé les résultats obtenu par des échantillons de références de 0% de taux de substitution.

Les résultats obtenu mentent qu'il est possible d'introduire les déchets de brique comme ajout cimentaire.

Mots clés: Ciment, ajout, recyclage, déchets de brique, propriétés, performances, traitement thermique, durabilité.

ملخص

تتضمن إعادة تدوير مخلفات الطوب الأحمر جانبيين رئيسيين، اقتصادي و البيئية، وخفض سعر التكلفة مع الحفاظ على الطبيعة من خلال الحمولات العالية النفايات الضخمة التي يمكن استعادتها. حاولنا من خلال هذا العمل التجريبي المساهمة في استعادة النفايات من الطوب الأحمر ونرى إمكانية إعادة إدخاله في صناعة الأسمنت إضافة الاسمنت.

ومن أجل تحقيق هدفنا، شرعنا في استعادة هذه النفايات المتاحة ويستخدم كمواد مألوفة ليحل محل الأسمنت CEMI جزئياً. ولتنفيذ هذا العمل، قمنا بإدخال حشوات الطوب المعاد تدويرها بمعدلات استبدال 8 و 16 و 24% ودراسة خواص المعكرونة في الحالة الطازجة (الطلب على الماء، الإعداد والثبات) والأداء الميكانيكي على الملاط في الحالة المتصلبة (المقاومة في الضغط والشد عن طريق الانحناء قبل وبعد المعالجة الحرارية عند درجة حرارة 50 إلى 400 درجة مئوية). كما قمنا بدراسة معايير الاستدامة وهي (امتصاص الماء بواسطة الغمر والشعيرات الدموية، المسامية التي يمكن الوصول إليها من قبل الماء، اختلافات الأبعاد والهجمات الكيميائية بالأحماض والقواعد) ثم مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها من العينات مراجع معدل الاستبدال 0%. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أنه من الممكن إدخال مخلفات الطوب كإضافة اسمنتي.

الكلمات المفتاحية: الأسمنت، الإضافة، إعادة التدوير، مخلفات الطوب، خصائص، الأداء، المعالجة الحرارية والمتانة.

Abstract

The recycling of red brick waste involves two main aspects, economic and environmental, reduce the cost price while preserving nature through high tonnages bulky waste that can be recovered.

Through this experimental work we tried to contribute to the recovery of waste from red brick and see the possibility of its reintroduction in the manufacture of cement as cement addition.

In order to achieve our objective we have proceeded to recover this available waste and used as fillers partially replaces CEMI cement.

To carry out this work we introduced recycled brick fillers with rates of substitution of 8, 16 and 24% and studied the properties on pasta in the fresh state (water demand, setting and stability) and the mechanical performances on mortar in the hardened state (resistance in compression and tension by bending before and after heat treatment at 50 to 400°C) and we also studied the sustainability parameters namely (water absorption by immersion and capillary, porosity accessible to water, dimensional variations and attacks chemical by acids and bases) then compared the results obtained by samples references of 0% substitution rate.

The results obtained show that it is possible to introduce brick waste as an addition cementitious.

Keywords: Cement, addition, recycling, brick waste, properties, performance, treatment thermal, durability.

Sommaire

Liste de tableaux

Liste de figures

Introduction générale

Chapitre I. Recherche Bibliographique

I.1. Introduction	05
I.2. Le ciment	05
I.2.1. Historique et l'origine du ciment	05
I.2.2. Constituants de ciment	05
I.2.2.1. Constituants de base	05
I.2.2.2. Constituant secondaires ou ajouts	06
I.2.3. Processus de fabrication du ciment	08
I.3. Valorisation des déchets de brique	11
I.3.1. Définition	12
I.3.2. Constitution chimique du déchet de brique	12
I.3.3. Utilisations des briques recyclées	12
I.3.4. Valorisation de déchet de brique dans le domaine du génie civile	13
I.4. Conclusion	14

Chapitre II. Caractérisation des matériaux

II.1. Introduction	16
II.2. Caractérisation des matériaux	16
II.2.1. Ciment	16
II.2.2. Fillers de brique rouge recyclé	18
II.2.3. Sable	19
II.2.4. Eau de gâchage	20
II.3. Conclusion	20

Chapitre III. Programme expérimental et méthodologie d'essais

III.1. Introduction	23
III.2. Programme expérimental	23
III.3. Formulation des mélanges	24
III.4. Fabrication des mélanges	25
III.5. Méthodes d'essais	29
III.5.1. Essai de consistance (EN 196-3)	29
III.5.2. Essai de prise (EN 196-3)	29
III.5.3. Essai de stabilité (l'expansion) (EN 196-3)	30
III.5.4. Essai de rupture par flexion (EN 196-1)	31
III.5.5. Essai de rupture par compression (EN 196-1)	32
III.5.6.1. Essai de retrait (NF P 15 - 433)	34
III.5.6.2. Mesure de la perte en poids	35

III.5.7. Essai d'absorption par immersion (NBN B 15-215)	35
III.5.8. Essai d'absorption capillaire [NBN EN 1925 : 1999]	36
III.5.9. Porosité accessible à l'eau	37
III.5.10. Essai d'attaque chimique par les acides et les bases (ASTM C- 267-97)	38
III.5.11. Essai pénétration de chlorure (UNI 7928 et JIS A 1171)	39
III.6. Conclusion	40

Chapitre IV. Effet des fillers recyclés sur propriétés du ciment

IV.1. Introduction	42
IV.2. Effet des fillers recyclés sur les propriétés de la pâte de ciment	42
IV.2.1. Variation de la demande en eau	42
IV.2.2. Début de prise et fin de prise	43
IV.2.3. Stabilité	43
IV.3. Effet des fillers recyclé sur les propriétés des mortiers	44
IV.3.1. Résistance à la compression	44
IV.3.2. Résistance à la traction par flexion	45
IV.3.3. Influence de la température sur la résistance et le poids des mortiers	46
IV.3.4. Variation dimensionnelle (retrait et perte en poids)	49
IV.3.4.1. Retrait et perte en poids	49
IV.3.4.2. Gonflement et gain en poids	50
IV.3.5. Variation de l'absorption d'eau par immersion	52
IV.3.6. Variation de l'absorption par capillarité	52
IV.3.7. Porosité accessible à l'eau	53
IV.3.8. Attaque des mortiers par HCL, CH ₃ COOH et KOH	54
IV.3.9. Influence des acides et des bases sur la résistance mécaniques des mortiers	56
IV.4. Conclusion	58
Conclusions générales	60
Références bibliographiques	63

Liste des figures

- Figure I-1:** Les constituants de base du ciment
Figure I-2: Laitier granulé de haut fourneau
Figure I-3: Fumée de silice
Figure I-4: Roches calcaires
Figure I-5: Extraction et concassage
Figure I-6: Stockage du ciment
Figure I-7: Déchet de brique
Figure I-8: Brique recyclé
Figure II-1: Ciment CEM I 42.5
Figure II-2: Mesure de la densité
Figure II-3: Mesure de la SSB
Figure II-4: Echantillon des fillers de brique recyclé
Figure II-5: Sachet de 1350 g de sable normalisé
Figure II-6: Courbe granulométrique du sable normalisé
Figure III-1: Malaxeur à mortier
Figure III-2: Moule triple pour prismes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$
Figure III-3: Table à chocs et remplissage des éprouvettes
Figure III-4: Vibration par table à chocs et moule à l'état final
Figure III-5: Enceinte climatique
Figure III-6: Etuve de laboratoire
Figure III-7: Essai de consistance
Figure III-8: Essai de prise
Figure III-9: Essai de stabilité
Figure III-10: Schéma mécanique de l'essai de traction par flexion trois points
Figure III-11: Essai de traction par flexion trois points
Figure III-12: Presse hydraulique de compression
Figure III-13: Essai de compression sur éprouvette $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$
Figure III-14: Deformetre
Figure III-15: Mesure du retrait
Figure III-16: Méthode de mesure de retrait et de gonflement
Figure III-17: Mesure du poids des éprouvettes
Figure III-18: Eprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ pour l'essai d'absorption par immersion
Figure III-19: Essai d'absorption capillaire
Figure III-20: Essai de la porosité accessible à l'eau.
Figure III-21: Eprouvettes immergé dans la solution 4% KOH
Figure III-22: Eprouvettes immergé dans la solution 4% CH₃COOH
Figure III-23: Essai pénétration des chlorures
Figure IV-1: Variation de la demande en eau en fonction du taux de substitution
Figure IV-2: Variation du temps de début et fin de prise en fonction du taux de substitution
Figure IV-3: Variation de la stabilité en fonction du taux de substitution
Figure IV-4: Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution
Figure IV-5: Influence de l'âge sur l'évolution de la résistance en compression
Figure IV-6: Variation de la résistance en traction par flexion en fonction du taux de substitution

- Figure IV-7:** Influence de l'âge sur l'évolution de la résistance en traction par flexion
- Figure IV-8:** Résistance en compression a l'âge 28jours en fonction de la température de traitement
- Figure IV-9:** Résistance en traction par flexion a l'âge 28jours en fonction de la température de traitement
- Figure IV-10:** Perte de masse des mortiers à l'âge 28jours en fonction de la température de traitement
- Figure IV-11:** Variation du retrait total des mortiers en fonction du temps
- Figure IV-12:** Variation de la perte en poids des mortiers en fonction du temps
- Figure IV-13:** Variation du gonflement des mortiers en fonction du temps
- Figure IV-14:** Variation du gain en poids des mortiers en fonction du temps
- Figure IV-15:** Evolution du coefficient d'absorption par immersion (A_b) en fonction du taux de substitution
- Figure IV.16:** Variation de l'absorption par capillarité en fonction du temps
- Figure IV.17:** Evolution de la porosité accessible à l'eau en fonction du taux de substitution
- Figure IV-18:** Variation de la perte de masse des mortiers en fonction de la période d'immersion dans 4% de CH_3COOH
- Figure IV-19:** Variation de gain en poids des mortiers en fonction de la période d'immersion dans 4% de KOH
- Figure IV-20:** Variation de gain en poids des mortiers en fonction de la période d'immersion dans 4% de NaCl
- Figure IV-21:** Perte de résistance en traction par flexion a l'âge 90jours des éprouvettes immergés dans 4% CH_3COOH
- Figure IV-22:** Perte de résistance en compression a l'âge 90jours des éprouvettes immergés dans 4% CH_3COOH
- Figure IV-23:** Perte de résistance en traction par flexion a l'âge 90jours des éprouvettes immergés dans 4% KOH
- Figure IV-24:** Gain de résistance en compression a l'âge 90jours des éprouvettes immergés dans 4% KOH

Liste des tableaux

Tableau I-1: Composition minéralogique du clinker

Tableau II.1: Composition chimique et minéralogique du ciment CEM I 42.5

Tableau II.2: Propriétés physiques et mécaniques du CEM I 42.5

Tableau II.3: Composition chimique et minéralogique des fillers de brique recyclé

Tableau II.4: Caractéristiques physiques du sable normalisé

Tableau II.5: Analyse chimique de l'eau

Tableau III.1: Les paramètres et les essais effectués pour la campagne I

Tableau III.2: Les paramètres et les essais effectués pour la campagne II

Tableau III.3: Composition des mélanges de pâtes de ciment

Tableau III.4: Composition des mélanges des mortiers

Tableau III.5: Opérations de malaxage de ciment

Tableau III.6: Opérations de malaxage du mortier

Introduction générale

Introduction générale

Les déchets de brique représentent l'un des plus grands défis environnementaux auxquels notre monde est confronté aujourd'hui. Leur accumulation excessive a des conséquences néfastes sur notre écosystème et menace la santé de notre vie. Face à cette problématique, il est impératif de trouver des solutions innovantes et durables pour gérer ces déchets.

Dans cette perspective, l'utilisation des déchets de brique recyclés dans divers domaines est devenue une alternative prometteuse. Une des applications intéressantes est l'intégration de ces déchets recyclés dans la construction, notamment comme ajout cimentaire. Cette approche offre de multiples avantages, tant sur le plan environnemental que sur le plan économique.

Cette technique innovante permet non seulement de réduire la quantité de déchets brique rouge envoyés en décharge, mais aussi d'améliorer les propriétés du ciment en termes de résistance et de durabilité. Cette étude explore les avantages, les défis et les perspectives de l'utilisation des déchets brique rouge recyclés comme ajout remplace partiellement un ciment CEMI, en mettant l'accent sur ses implications pour l'industrie de la construction et son impact dans le domaine de génie civil.

Cette étude qui s'inscrit dans ce contexte vise la valorisation et la réutilisation des déchets de briques comme fillers remplacent partiellement de le ciment(formulation des pâtes et mortiers) avec des taux de 8%, 16% et 24% et étudie l'effet de ces fines sur les propriétés a l'état frais et durci en suite comparé les résultat avec un béton de référence de 0% de taux de substitution.

L'idée est donc d'introduire les fillers de déchets de brique comme ajout cimentaire et cela permet:

- +D'éliminer les déchets par recyclage et réutilisation d'où la protection de l'environnement,
- + Trouver une autre source des granulats et préservé nos ressource naturelle,
- +Donner une seconde vie à nos déchets,
- +Développer un nouveau matériau de construction.

Cemémoire est divisé en quatre (04) chapitres dont le contenu a été distribué comme suit:

-**Le premier chapitre** présente une recherche bibliographique sur les le ciment (composition, propriétés, formulation, fabrication et mise en œuvre et utilisation), avec un recherchesur les déchetsde brique que nous avons utilisé dans cette étude.

- **Le deuxième chapitre** décrit la provenance et la caractérisation des matériaux utilisés pourréaliser ce travail à s'avoir le sable, le ciment et les fillers de déchets de briques. Il présente également les résultats des essais de caractérisations pour chaque matériau utilise dans cette étude.

-**Le troisième chapitre** détaille le programme expérimental, la formulation des différentes compositions et les méthodes de fabrication des mélanges pour chaque essai. On décrit dans ce chapitre les principaux essais réalisés sur les différentes formulations retenues dans cette étude.

-Dans le **quatrième chapitre** on analyse les principaux résultats des essais réalisés sur les pâtes et mortiers par l'étude de l'effet du taux de substitution des fillers recyclés sur le comportement du matériau cimentaire à l'état frais ainsi qu'à l'état durci.

A la fin de ce travail on sort avec quelques conclusions générales de tous les résultats obtenus, sur la possibilité de revaloriser le déchet de brique dans la fabrication du ciment.

Chapitre I: Recherche bibliographique

I. Recherche Bibliographique

I.1. Introduction

Dans cette première partie, nous la consacrons à la synthèse bibliographique afin d'étudier l'influence de la substitution partielle du ciment par des fillers de déchet de brique. Nous allons détailler ce qu'un ciment, ses constituants de base, ses processus de fabrication, sa consommation nationale et mondiale mais surtout l'impact de cette industrie sur l'environnement en citant ses différentes émissions.

En second lieu, nous exposerons une revue bibliographique sur les déchets de brique et leurs valorisations dans le domaine du génie civil.

I.2. Le ciment

Le ciment est une matière pulvérulente qui, mélangée à de l'eau ou une solution saline, forme une pâte plastifiante capable d'agglomérer diverses substances en durcissant. Il est utilisé dans la construction pour lier des matériaux tels que le sable, le mortier, ou les graviers, afin de produire du béton. Le ciment peut être naturel ou artificiel, et il est composé principalement de chaux et de silice. Il durcit rapidement, conserve sa résistance même sous l'eau, et est largement utilisé dans l'industrie du bâtiment. Le ciment peut également désigner tout matériau interposé entre deux corps durs pour les lier.

I.2.1. Historique et l'origine du ciment

Le ciment, en tant que liant d'origine minérale, est utilisé depuis des millénaires. Dans l'Égypte antique, un mortier de plâtre liait les pierres. Les chinois et les mayas utilisaient également des mortiers à base de chaux obtenue par la cuisson de roches calcaires, une base du ciment actuel. Les romains utilisaient de la chaux renforcée par des cendres volcaniques pour fabriquer un mortier capable de prendre sous l'eau. En 1824, Joseph Aspdin améliore la recette et crée le ciment portland. En France, le technicien Pavin de Lafarge installe ses premiers fours à chaux en 1833, marquant le début de la production industrielle du ciment. Louis Vicat, ingénieur français, invente le ciment artificiel en 1817, contribuant au développement du ciment industriel au XIX^e siècle.

I.2.2. Constituants de ciment

I.2.2.1. Constituants de base

Les constituants de base du ciment (**Figure I-1**) sont la chaux (CaO), la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃), et l'oxyde de fer (Fe₂O₃). Ces éléments sont présents dans des matériaux tels que le calcaire, l'argile, et le sable, qui sont extraits de carrières et mélangés en proportions spécifiques avant d'être broyés et cuits dans un four rotatif pour produire du clinker. Le clinker est ensuite refroidi et finement broyé avec du gypse pour produire la poudre de ciment. D'autres composants tels que le laitier de haut fourneau, les cendres volantes, les schistes calcinés, le calcaire, et les pouzzolanes naturelles ou artificielles peuvent également être ajoutés pour produire différents types de ciment avec des propriétés spécifiques.

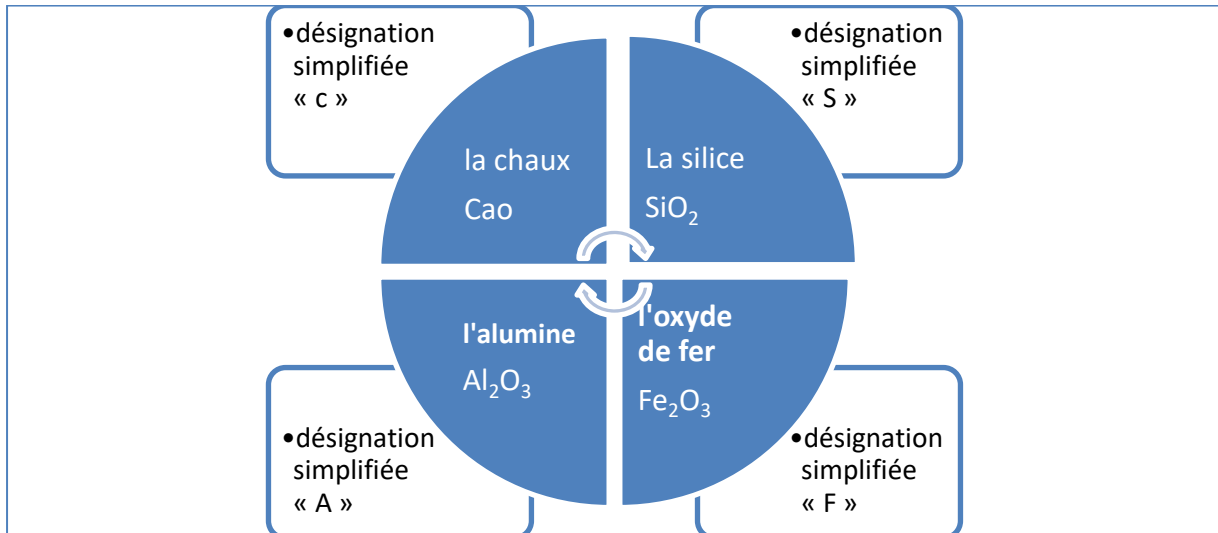


Figure I-1: Les constituants de base du ciment

Ces quatre éléments de base ne se trouvent pas dans la nature dans des états adéquats favorisant l'émergence des liants hydrauliques. En effet, la chaux CaO se carbonate facilement en absorbant le gaz carbonique de l'air, pour devenir de la roche calcaire, en abondance dans la nature. Les trois oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) abondent dans la nature sous forme cristallisée et stable (sable, argiles, etc.). Ils doivent donc subir un traitement approprié pour les amener dans un état de réactivité.

a .Le clinker

Le clinker est un constituant du ciment, qui résulte de la cuisson à très haute température d'un mélange composé d'environ 80 % de calcaire ($CaCO_3$ qui apporte l'oxyde de calcium, CaO) et de 20 % d'aluminosilicates qui apportent les oxydes de silicium (SiO_2), d'aluminium (Al_2O_3) et de fer (Fe_2O_3). La « farine » ou le « cru » est formé du mélange de poudre de calcaire et d'argile. La cuisson, ou clinkérisation, se fait à une température d'environ $1450\text{ }^\circ\text{C}$, ce qui explique la forte consommation énergétique de ce processus. Le clinker se présente sous la forme de nodules durs et cristallisés, de teinte grise foncée pour les ciments habituels et verte pour le clinker de ciment blanc.

La composition des clinkers gris est représentée par quatre grandes phases cristallines caractéristiques de la chimie du ciment (**Tableau I-1**).

Tableau I-1: Composition minéralogique du clinker		
Ca_3SiO_5	Alite	Silicate tricalcique ($SiO_2 - 3 CaO$): 45 à 65 %
Ca_2SiO_4	Bélite	Silicate bicalcique ($SiO_2 - 2 CaO$): 10 à 30 %
$Ca_3Al_2O_6$	Aluminate	Aluminate tricalcique ($Al_2O_3 - 3 CaO$) : 5 à 15 %
$Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$	Ferrite	Alumino ferrite tétracalcique ($Al_2O_3 - Fe_2O_3 - 4 CaO$)

I.2.2.2. Constituant secondaires ou ajouts

a. Laitier granulé de hauts fourneaux

Les Laitiers de haut-fourneaux (**Figure I-2**), sont des matériaux majoritairement vitreux, sous-produits de l'élaboration de la fonte résultant de la réduction des minerais de fer. Les laitiers de hauts fourneaux présentent une hydraulité potentielle qui nécessite une activation calcique ou sulfo-calcique et qui confère aux ciments en contenant une stabilité accrue aux agents chimiques agressifs. Une fois broyé finement le laitier vitrifié de haut fourneau peut être un constituant principal du ciment autre que le clinker ou introduit comme addition au béton.



Figure I-2: Laitier granulé de haut fourneau

b. Cendres volantes

Poudre fine constituée principalement de particules vitreuses de formesphérique issues de la combustion de charbon pulvérisé en présence ou non de combustibles, ayant des propriétés pouzzolaniques.

c. Pouzzolane naturelle

Est une roche naturelle de composition silico- alumineuse et de texture majoritairement vitreuse généralement d'origine volcanique. Il existe toutefois des pouzzolanes d'origine sédimentaire (diatomite, radiolarite, Gaize) et des pouzzolanes artificielles (cendres volantes, argiles calcinées, ...). Les pouzzolanes développent par hydratation en présence de chaux des hydrates liants de nature analogue à ceux du clinker.

a. Fumées de silices

La fumée de silice (**Figure I-3**), un sous-produit de l'industrie du ferrosilicium, est un matériau hautement pouzzolanique utilisé pour améliorer les propriétés mécaniques et de durabilité du béton. Il peut être ajouté directement au béton en tant qu'ingrédient individuel ou dans un mélange de ciment Portland et de fumée de silice.



Figure I-3: Fumée de silice

e. Calcaires

La majorité des roches sédimentaires sont des calcaires(**Figure I-4**) composés principalement de carbonate de calcium. Le calcium provient de l'altération d'autres roches comme le basalte ou le gneiss. Les carbonates sont présents dans les solutions qui ont dissous du gaz dioxyde de carbone.



Figure I-4: Roches calcaires

I.2.3. Processus de fabrication du ciment

Le ciment Portland artificiel, le CPA, résulte du broyage du clinker avec environ 5% de gypse pour réguler la prise. Le clinker est une roche artificielle obtenue par cuisson à 1450°C, constitué le plus souvent d'un mélange d'environ 80% de calcaire (apportant la CaO) et d'environ 20% d'argile. Les clinkers peuvent être très différents les uns des autres du fait de la composition du cru, du mode de cuisson et du refroidissement. C'est dire qu'en les broyant à des finesses variées avec des teneurs en gypse plus ou moins importantes, on obtiendra des

ciments portland artificiels n'ayant pas les mêmes caractéristiques. On fabrique des ciments encore plus variés grâce à l'ajout de constituants secondaires tels que les laitiers de haut fourneau (L), les cendres volantes (C), les pouzzolanes (z), et la fumée de silice (D). Schématiquement selon, la fabrication des ciments se réduit aux 5 étapes principales.

a. Extraction et concassage

Le calcaire et la marne sont extraits par manutention mécanique une fois la roche abattue à l'explosif et par ripage au niveau de deux carrières. Les tout venants transportés par des Dumpers de charges utiles de 26 à 60 tonnes (**Figure I-5**).

Le calcaire et la marne sont concassés séparément dans des ateliers de concassage pour une réduction de 0-25mm. Les matières traitées sont transportées vers l'usine par tapis roulant vers un hall de stockage et de pré homogénéisation



Figure I-5:Extraction et concassage

b. Préparation du cru

***Formulation du cru,** L'étude du gisement des matières premières permet de définir la composition exacte du cru avec les besoins en ajouts qu'exige le procédé de fabrication. La qualité et la régularité requises pour les matières premières assurent, au final, la qualité de ciment recherchée. Le ciment nécessite des teneurs proportionnées des différents composants : chaux, silice, alumine.

***Préhomogénéisation,** Il s'agit tout d'abord d'un mode de stockage qui permet de construire un tas de matière pré dosée à partir de différentes matières concassées. L'objectif principal est d'aboutir à une uniformité maximale des stocks. La méthode utilisée est celle de constitution de tas de roches superposés. Leur récupération transversale a été spécialement conçue pour assurer une plus grande régularité de la composition chimique du mélange minéral, malgré la diversité des veines géologiques de la carrière. C'est à partir de l'analyse chimique de ce premier mélange que le fabricant décide ou non d'ajuster la composition de son cru par les ajouts éventuellement nécessaires (bauxite, oxyde de fer, ...).

***Les halls,** Les halls de pré-homogénéisation peuvent être circulaires ou rectangulaires en fonction des cimenteries. Cette opération est réalisée dans un hall pour aboutir à un mélange pré homogène en disposant la matière en couches horizontales superposées, puis en la reprenant verticalement à l'aide d'une roue-pelle ou d'une herse (gratteur). Une sorte de mille-feuille géante constituée des matières concassées après l'extraction. Les stocks peuvent varier mais ils sont généralement constitués de deux tas de matière concassée. Le tonnage des tas peut varier de 10 000 à 100 000 tonnes chacun.

***Broyage du cru,** Le broyage procède par fragmentations successives des grains jusqu'à obtenir des grains de faible dimension pour faciliter leur cuisson. L'échange thermique et les réactions chimiques sont en effet d'autant plus intenses lors de la cuisson que les surfaces de contact entre les grains de matière et les gaz sont importantes.

***L'homogénéisation,** Ultime étape avant la cuisson, l'homogénéisation, par un brassage intime, confère à la matière crue une composition chimique stable. De cette stabilité dépend la régularité des propriétés du clinker.

c. Différentes étapes de la cuisson

La transformation du cru au clinker.

***Le préchauffage,** L'opération commence par l'évaporation de l'eau que le mélange cru contient et se poursuit par la décarbonatation. Le préchauffage se fait dans une série de cyclones, disposés verticalement sur plusieurs étages, appelée " préchauffeur". La matière froide, introduite dans la partie supérieure, se réchauffe au contact des gaz. D'étage en étage, elle arrive partiellement décarbonatée, jusqu'à l'étage inférieur, à la température d'environ 800°C.

***La pré-calcination,** Elle se fait dans le pré-calciateur placé entre le préchauffeur et le four. La décarbonatation commencée dans le préchauffeur se fait pour l'essentiel dans le pré-calciateur et se termine dans le four. Cette opération, qui s'effectue à des températures entre 650 et 900°, permet de libérer le gaz carbonique pour obtenir la chaux nécessaire à la fabrication de clinker.

***La clinkérisation,** Cette opération a lieu dans le four. Portés à haute température, entre 1450 et 1550°, la chaux, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer, apportés par les matières premières, se combinent entre eux pour former les nouveaux composés chimiques qui entrent dans la composition minéralogique du clinker. Après refroidissement, le clinker se présente sous la forme de granules d'environ (0.5 à 4 cm) de diamètre, le clinker évacué par tapis vers le hall/silo à clinker où il sera stocké en attendant d'être broyé pour faire du ciment. La capacité de stockage peut atteindre plusieurs dizaines de milliers de tonnes (60 000 tonnes en bas).

d. Broyage ciment

Le ciment est obtenu par broyage de clinker, de gypse, d'ajouts et d'additifs secondaires.

-Le broyage, Comme pour le cru, le broyage procède par fragmentations successives des grains pour augmenter la réactivité du clinker en augmentant la surface de contact. Ce traitement développe les propriétés hydrauliques du ciment.

-Le gypse, Additionné à toutes les classes de ciment, le gypse opère comme régulateur du temps de prise du ciment lorsqu'on le mélange à l'eau. Il assure l'ouvrabilité du ciment, c'est-à-dire la possibilité de manipuler le mortier et le béton avant leur durcissement.

-Les ajouts, Les ajouts déterminent les propriétés et certaines des qualités d'usage des ciments. Parmi ceux-ci, on trouve la pouzzolane, le laitier, la fumée de silice, les schistes calcinés et le calcaire. Le calcaire est l'additif le plus généralement utilisé (ils utilisés dans une proportion excédant 5 %, en masse). On détermine la nature et les proportions des ajouts en fonction du type de ciment et de la classe de résistance recherchés. Le ciment est livré en sac ou en vrac.

e. Stockage et expédition de ciment

Après le broyage, les ciments sont envoyés dans des silos. Un silo ne peut recevoir qu'une qualité de ciment bien définie. La capacité courante est de l'ordre de 2000 à 5000 tonnes, mais peut varier selon les usines et les produits à conserver. Le ciment est ensuite commercialisé, en vrac, par camions ou en train pour alimenter des dépôts (proches des agglomérations), soit en sacs (50kg) pour alimenter les négociants de matériaux et les grandes surfaces de bricolage (GSB).

Le ciment doit être stocké (**Figure I-6**) dans un entrepôt intérieur frais, sec et ventilé. Dans ces conditions, le ciment est censé avoir une durée de vie d'environ 1 an pour un seau non ouvert.



Figure I-6:Stockage du ciment

I.3. Valorisation des déchets de brique

I.3.1. Définition

Les déchets (**Figure I-7**) de issues de la brique qui est un matériau de construction qui est fabriqué en portant une petite quantité d'argile, préalablement mise en forme, à une température appropriée. Les particules d'argile commencent alors à fondre et s'agglomèrent pour former une masse à caractère pierreux. Après la cuisson, la brique conserve une certaine porosité, qui lui confère d'ailleurs des propriétés spécifiques et la distingue des autres matériaux de construction.



Figure I-7: Déchet de brique

I.3.2. Constitution chimique du déchet de brique

Les briques réfractaires sont fabriquées à partir de différentes sortes d'argiles comme l'argile illitique d'une couleur brune grisâtre à rouge après cuisson, kaolin très brillant, les bravaistes orangées à rose plus ou moins sous forme d'oxydes hydratés. Contenant principalement le dioxyde de silicium (SiO_2) et l'aluminium (Al_2O_3). Les éléments colorants dont la proportion détermine la couleur de la brique en plus du degré de cuisson et un autre facteur déterminant de cette couleur. Ces éléments sont, l'oxyde de fer, l'oxyde de titane.

I.3.3. Utilisations des briques recyclées

I.3.3.1. Matériaux de remplissage et de stabilisation dans les infrastructures

-Routes secondaires, Pendant de nombreuses années, les déchets de maçonnerie et les rebuts de briques ont été utilisés pour remplir et stabiliser les routes secondaires, en particulier dans les zones humides telles que les bois et les champs. Cette pratique est courante dans les pays qui manquent de réserves de pierre suffisantes comme le Danemark. Ce matériau est généralement utilisé non broyé.

-Routes principales, Les briques, les tuiles et autres maçonneries en terre cuite broyée peuvent être utilisées dans des projets de construction routiers plus importants, en particulier sous forme de couche de base non traitée.

I.3.3.2. Agrégats pour béton in situ et préfabriqué et mortiers

Les briques en terre cuite broyée et autres maçonneries peuvent également être utilisées pour niveler et remplir les tranchées de canalisations. Le matériau broyé remplacera les matériaux naturels tels que le sable et perturbera donc moins le paysage. Une granulométrie fine d'environ 0-4 mm est généralement utilisée pour le matériau de remplissage des tranchées de canalisations qui se compose essentiellement de maçonnerie broyée. Des particules plus grossières peuvent être utilisées dans d'autres applications (par exemple, agrégats dans le béton et les mortiers). La maçonnerie broyée utilisée à cet usage doit être exempte de contaminants pouvant être lixiviés par l'eau et causer une pollution des nappes phréatiques.

I.3.3.3. Agrégats pour briques silico-calcaires

Les briques, tuiles et autres maçonneries en terre cuite broyée peuvent également être utilisées comme agrégat dans le béton coulé. Le matériau broyé remplace les autres matières premières telles que le sable et entraîne moins de perturbations dans le paysage. La fabrication d'agrégats de maçonnerie broyée (**Figure I-8**) pour le béton implique le broyage, le tri et le nettoyage des déchets de démolition.



Figure I-8 brique recyclé

I.3.4. Valorisation de déchet de brique dans le domaine du génie civile

La valorisation est définie comme l'élimination des déchets comporte les opérations de collecte, transport, stockage, tri et traitement nécessaires à la récupération des éléments et matériaux réutilisables ou de l'énergie, ainsi qu'au dépôt ou au rejet dans le milieu naturel de tous autres produits dans des conditions propres à éviter les nuisances.

I.3.4.1. Recyclage des déchets

Le recyclage permet de réduire les volumes de déchets, et donc leur pollution, et de préserver les ressources naturelles en réutilisant des matières premières déjà extraites. Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dits des trois R:

- Réduire,
- Réutiliser,
- Recycler.

Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement et par incinération, mais il n'est pas suffisant pour contrer l'augmentation de la production des déchets ou y suffit à peine.

I.3.4.2.Impacts du recyclage sur l'environnement

Les bénéfices économiques et environnementaux du recyclage sont considérables:

- Il permet de protéger les ressources, de réduire les déchets, de créer des emplois, de protéger la nature et d'économiser les matières premières,
- L'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer,
- Le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité,
- L'aluminium est recyclable à 100%; 1 kg d'alu donne 1 kg d'aluminium (après avoir été fondu),
- Chaque feuille de papier recyclé fait économiser 1 L d'eau et 2,5W d'électricité en plus de 15 g de bois.

I.3.4.3.Procédés du recyclage

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage:

- Chimique «mécanique et organique,
- Le recyclage dit « chimique » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants,
- Le recyclage dit «mécanique» est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer ou pour séparer par courants de Foucault,
- Le recyclage dit «organique» consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons constitués un banque de donné sur le ciment, définition, constituant, déférent types, et le domaine d'utilisation en suite nous avons défini le déchet de brique, composition chimique, utilisation et leur valorisation dans le domaine du génie civile.

Chapitre II: Caractérisation des matériaux

II. Caractérisation des matériaux

II.1.Introduction

Dans ce chapitre nous présentons la caractérisation des matériaux utilisés pour réaliser les différents essais expérimentaux de notre programme de recherche, à savoir:le ciment, le fillers brique recyclé, le sable normalisé et l'eau de gâchage.

II.2.Caractérisation des matériaux

L'ensemble des matériaux utilisé dans ce travail:

- Un ciment de type CEMI 42.5 provenant de la cimenterie Biskra.
- Un sable normalisé fourni par la cimenterie de Hdjar soud- Skikda
- Fillers de brique rouge recyclé obtenue par broyage des déchets (chutes de brique) de brique.
- Eau de gâchage de source Besbassa -Skikda.

II.2.1. Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude pour l'ensemble des compositions, est un ciment portland de type CEM Ide classe 42,5,conforme à la norme algérienne NA 442 (**Figure II-1**), provenant de la cimenterie Biskra (Algérie).

Ses caractéristiques chimiques et minéralogiques sont données par le **Tableau II-1**.



Figure II-1:Ciment CEM I 42.5

- Propriétés physiques de ciment

- La densité est de 3.47g/cm^3 , déterminée à l'aide de densimètre le Chatelier, en utilisant l'acétone (**Figure II-2**).



Figure II-2: Mesure de la densité

- **La surface spécifique de Blaine**, est de $2545\text{cm}^2/\text{g}$, déterminée conformément à la norme EN 196-6 par la méthode de perméabilité à l'air (**Figure II-3**), qui consiste à observer le temps mis par une quantité fixée d'air pour traverser un échantillon de ciment ou de fillers compact dans la cellule de perméabilimètre de Blaine. Plus la surface spécifique de la poudre est importante et plus le temps mis par l'air pour traverser la poudre est long.



Figure II-3: Mesure de la SSB

- **L'analyse chimique**, a été faite par fluorescence par rayon X et par la méthode classique. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment sont présentées dans le **Tableau II-1**.

Tableau II-1: Composition chimique et minéralogique du ciment CEM I 42.5			
Désignation	Résultats en %	Désignation	Résultats en %
CaO	63.57	CaO Libre	0
Al ₂ O ₃	4.22	SO ₃	2.81
Fe ₂ O ₃	5.30	MS	2.17
SiO ₂	20.62	PAF	4
MgO	2.29	C ₃ S	66.08
Na ₂ O	0.16	C ₂ S	9.29
K ₂ O	0.53	C ₃ A	2.23
Cl ⁻	0.031	C ₄ AF	16.11

*Les propriétés physiques et mécaniques sont présentées dans le **Tableau II-2**.

Tableau II-2: Propriétés physiques et mécaniques du CEM I 42.5			
	2jours	7jours	28jours
Résistance en traction par flexion en MPa	3.47	5.45	8.2
Résistance en compression en MPa	16.83	24.16	47.3
La prise	Début de prise	Fin de prise	/
	228mm 45s	372mm 22s	/

II.2.2. Fillers de brique rouge recyclé

L'ajout utilisé dans notre programme de recherche est les fillers de déchets de brique rouge recyclé (**Figure II-4**), sont des chutes de brique récolté de plusieurs endroits de la région de Skikda.

Après leur broyage à la finesse désirée, cet ajout au ciment a une surface spécifique de **6215cm²/g** et une masse volumique absolue de **2.64g/cm³**.



Figure II-4: Echantillon des fillers de brique recyclé

Les caractéristiques chimiques et minéralogiques des fillers de brique, sont présentées dans le **Tableau II-3**.

Désignation	Résultats en %	Désignation	Résultats en %
CaO	4.76	SO ₃	0.76
Al ₂ O ₃	15.42	K ₂ O	2.33
Fe ₂ O ₃	6.54	Cl ⁻	0.017
SiO ₂	61.63	PAF	9
MgO	1.70	Na ₂ O	0.64

Les fillers de brique recyclé sont composés essentiellement de 61.63% SiO₂ ; 15.42 % Al₂O₃ et d'autres composants en faible pourcentage

II.2.3. Sable

Les mortiers sont confectionnés avec un sable normalisé CEN EN 196-1 conforme à la norme ISO 679, de nature siliceuse, à grains arrondis, dont la teneur en silice est égale à 98%. Il est délivré en fractions mélangées en sacs plastiques d'un contenu de 1350 g ± 5 g (**Figure II-5**).



Figure II-5: Sachet de 1350g de sable normalisé

Ses caractéristiques physiques sont représentées dans le **Tableau II-4**.

Masse volumique apparente en g/cm ³	1.63
Masse volumique absolue en g/cm ³	2.5
Module de finesse en %	2.32
Equivalent de sable en %	97 %

La courbe granulométrique de ce sable est présentée dans la **Figure II-5**.

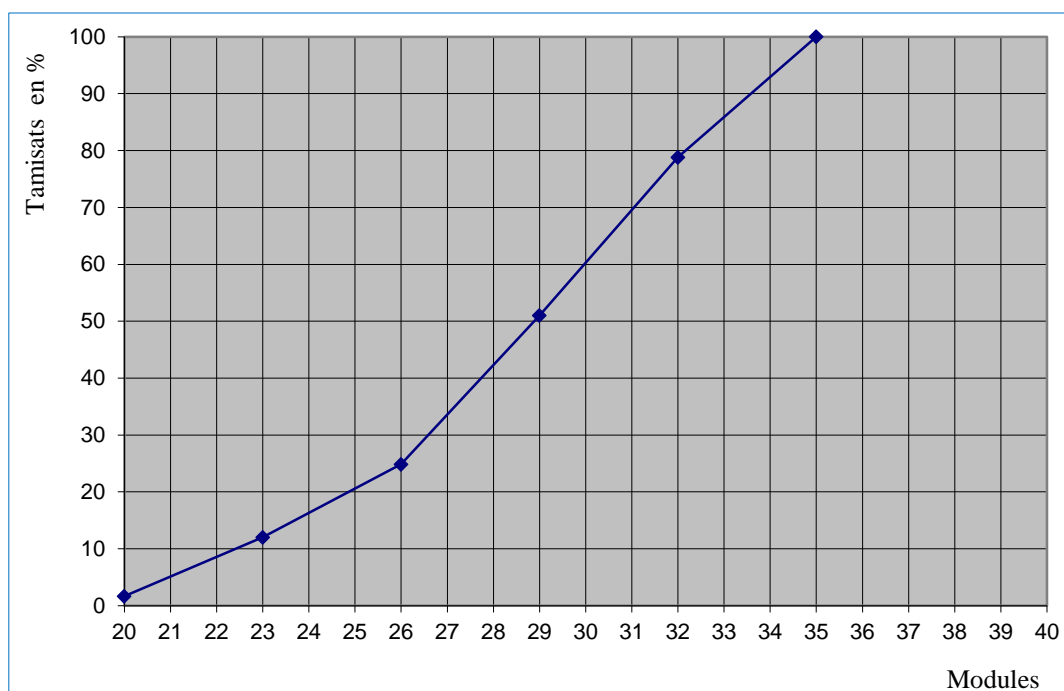


Figure II-6: Courbe granulométrique du sable normalisé

II.2.4. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est l'eau de source BESBASSA. L'analyse chimique est représentée dans le **Tableau II-5**, dont les résultats répondent à toutes les prescriptions de la norme EN 1008.

Calcium Mg/l	Magnésie Mg/l	Potassium Mg/l	Sodium Mg/l	Bicarbonate Mg/l	Sulfates Mg/l	Chlorures Mg/l
54	2.64	2	5	164.7	4	10
Nitrates Mg/l		Résidu sec à 180°		PH	T°	
9		206		7.29	20	

II.3. Conclusion

Le travail présenté dans ce chapitre traite séparément les caractéristiques des matériaux de bases utilisés dans l'étude expérimentale, à savoir: le ciment, le fillers de brique recyclé, le sable normalisé et l'eau de gâchage.

Ensuite, nous avons donné les principaux résultats des essais de caractérisation des constituants des différentes compositions de notre programme de recherche .D'après les résultats obtenus, nous avons tiré les observations suivantes :

- La densité absolue du ciment est supérieure à celle du fillers brique recyclé;

- La surface spécifique du ciment est inférieure à celle du fillers brique. Cette finesse impacte les principales propriétés physiques et mécaniques des ciments et mortiers.
- La présence de SiO_2 dans les fillers recyclés engendre une augmentation des résistances mécaniques à long terme et donne une grande durabilité au ciment et surtout au milieu agressif.
- La présence de Al_2O_3 dans les fillers recyclés de déchets de brique contribue à la prise et au durcissement rapide du ciment, cependant, une haute teneur en Al_2O_3 donne un ciment très sensible à la corrosion sulfatée.
- La présence de Al_2O_3 dans les fillers de déchet de brique offre beaucoup de C3A qui confère au ciment une très bonne résistance initiale à 1 ou 2 jours de durcissement. Mais par la suite, il influe très peu sur cette dernière. Il est sensible aux eaux de mer à cause des sulfates qu'il contient. Il forme avec les sulfo-aluminates de chaux, des sels souvent très expansifs.

L'analyse des résultats de caractérisation des différents matériaux étudiés dans ce chapitre, montre que les matériaux utilisés sont appropriés pour la confection des pâtes et mortiers, objet de notre programme expérimental.

**Chapitre III:
Programme expérimental et méthodologie
d'essais**

III. Programme expérimental et méthodologie d'essais

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, une description détaillée sur le programme expérimental, les essais expérimentaux, la préparation des mélanges et les différentes méthodes d'essais sur les pâtes et les mortiers de ciment.

L'étude expérimentale a été réalisée au niveau du laboratoire national du complexe GICA de Hdjar soud-Skikda.

III.2. Programme expérimental

L'objectif de ce travail est d'introduire les fillers de brique rouge recyclé comme ajout cimentaire par la substitution d'une partie de ciment par cet ajout avec des taux de 0%, 8%, 16% et 24%, et étudier les modifications apportés sur les pate de ciment et sur les mortiers.

Pour réaliser ce travail, le programme expérimental est divisé comme suit:

Campagne 1: Fabriquer à partir du ciment CEM I 42.5 et des fillers de brique recyclé des pâtes de ciment avec des taux de substitution 0%, 8%, 16 et 24% (**Tableau III-1**).

Tableau III-1: Les paramètres et les essais effectués pour la campagne I	
Notation	Type de la pâte de ciment
P(0%)	Pâte de ciment à base de ciment CEM I
P(8%)	Pâte de ciment à base 92% de ciment CEM I et 8% de fillers de brique recyclé
P(16%)	Pâte de ciment à base 84% de ciment CEM I et 16% de fillers de brique recyclé
P(24%)	Pâte de ciment à base 76% de ciment CEM I et 24% de fillers de brique recyclé
Paramètres constants	Consistance normalisée
Paramètres variables	Taux de substitution
Essais effectués	Demande en eau (consistance) Prise Stabilité
Nombre de mélange	04

Campagne 2: Fabriquer à partir du ciment CEM I 42.5 et de de fillers de brique recyclé des mortiers avec des taux de substitution 0%, 8%, 16 et 24% (**Tableau III-2**).

Tableau III-2: Les paramètres et les essais effectués pour la campagne II	
Notation	Type de mortier
M(0%)	Mortier à base de ciment CEM I
M(8%)	Mortier de ciment à base 92% de ciment CEM I et 8% de fillers de brique recyclé
M(16%)	Mortier à base 84% de ciment CEM I et 16% de fillers de brique recyclé
M(24%)	Mortier à base 76% de ciment CEM I et 24% de fillers de brique recyclé
Paramètres constants	E/C=0,5 - Sable normal
Paramètres variables	Taux de substitution
Essais effectués	-Rupture par flexion à 2, 28 jours. -Rupture par compression à 2, 28 jours. -Rupture par flexion puis en compression et perte en masse à 28 jours après traitement thermique à 50°C, 100°C. -Retrait et perte en poids à 3, 14, 28jours. -Gonflement et gain en poids à 3,14, 28jours. -Absorption d'eau par immersion. -Absorption d'eau par capillarité -Porosité accessible à l'eau. -Attaque chimique par les alcalins 4% KOH à 3, 14, 28jours.
Nombre de mélange	20

III.3. Formulation des mélanges

a. Formulation des mélanges pour la campagne 1

Ces mélanges doivent avoir une consistance normalisée quelque soit le taux de substitution de l'addition, les différentes formulations sont présentées dans le **Tableau III-3**.

Tableau III-3: Composition des mélanges de pâtes de ciment		
Notation	CEM I (g)	Fillers recyclés(g)
P (0%)	500	0
P(8%)	469.57	30.43
P (16%)	439.14	60.86
P(24%)	408.71	91.29

b. Formulation des mélanges pour la campagne 2

Les différentes formulations sont représentées dans le **Tableau III-4**.

Tableau III-4: Composition des mélanges des mortiers				
Notation	Ciment (g)	Fillers recyclés (g)	Sable (g)	Eau (ml)
M(0%)	450	0	1350	225
M(8%)	422.61	27.39	1350	225
M(16%)	395.14	54.77	1350	225
M(24%)	367.84	91.29	1350	225

III.4. Fabrication des mélanges

***Malaxage de ciment**

Le malaxage se fait dans un malaxeur (**Figure III-1**) décrit par la norme EN196, les opérations de malaxage sont récapitulées dans le **Tableau III-5**.

Tableaux III-5: Opérations de malaxage de ciment					
Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment		Raclage de la cuve	
Durée des Opérations		5 à 10s	90s	30s	90s
Etat du Malaxeur	Arrêt		Vitesse lente	Arrêt	Vitesse lente



Figure III-1: Malaxeur à mortier

***Malaxage de mortier normal**

Le mortier normal est réalisé conformément à la norme EN196-1. Le malaxage se fait dans un malaxeur décrit dans la **Figure III-1**, les divers constituants du mortier sont malaxés de façon à avoir un matériau de composition homogène. Les opérations de malaxage sont récapitulées dans le **Tableau III-6**.

Tableaux III-6 : Opérations de malaxage du mortier								
Operations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment		Introduction du sable		Raclage de la cuve		
Durée des opérations			30s	30s	30s	15s	1 min 15s	60s
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêt		Vitesse rapide

***Moules**

Après le malaxage, le mélange est introduit dans des moules normalisés en acier permettant de réaliser les éprouvettes des essais programmés:

+Moule prismatique: moule triple pour prismes de mortier (40x40x160) mm³, pour l'essai de compression et traction par flexion ainsi que l'essai d'absorption par capillarité, immersion et porosité accessible à l'eau(**Figure III-2**).

+Moule prismatique avec plots: moule triple pour prismes de mortier (40x40x160) mm³, équipé de plot pour l'essai de retrait, gonflement, perte et gain en poids.

+Moule cubique de dimension 50x50x50 mm³ pour l'essai de pénétration des chlorures.



Figure III-2:Moule triple pour prismes 4x4x16cm³

*Remplissage et vibration

Avant le remplissage des moules, on applique un lubrifiant sur leurs parois pour éviter toute cohésion de la pâte, le remplissage des éprouvettes se fait en deux couches vibrées sur une table à chocs.

On fixe le moule sur la table à chocs (**Figure III-3**) pour le tassement (2x60 coups) selon la norme AFNOR NF P15-412 et la norme EN 196-1. On arase puis on lisse la surface du moule en enlevant l'excédent de mortier (**Figure III-4**).



Figure III-3: Table à chocs et remplissage des éprouvettes



Figure III-4: Vibration par table à chocs et moule à l'état final

*Conservation des éprouvettes

- On introduit les moules dans une chambre humide à $20^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ pendant 24 heures.

- Après 24 heures on démoule et on introduit les éprouvettes dans un bain d'eau, ou dans une enceinte climatique (**Figure III-5**) de plus de 90% d'humidité et de température de $20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$.
- Les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'à une durée correspondante à l'âge des éprouvettes à tester pour les essais de traction et de compression et porosité accessible à l'eau.
- Les éprouvettes destinées à l'essai de retrait sont conservées:
 - A l'air libre à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ pour la mesure du retrait total et la variation de masse (perte de masse),
 - A l'eau à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ pour la mesure du gonflement et la variation de masse,
- Les éprouvettes destinées à l'essai d'absorption par immersion sont conservées 28 jours dans l'eau ensuite dans l'étuve à 105°C (**Figure III-6**) pendant 24 heures, ensuite elles sont immergées totalement dans l'eau à 20°C pendant une durée de 24 heures.
- Les éprouvettes destinées à l'essai d'absorption capillaire, sont conservées 28 jours dans l'eau ensuite dans l'étuve à 105°C pendant 72 heures.
- Après 28 jours d'immersion dans l'eau, les éprouvettes destinées à l'attaque chimique sont conservées dans une solution 4% d'acide acétique (CH_3COOH) et 4% hydroxyde de potassium.
- Les éprouvettes destinés à la pénétration des chlorures sont conservés 28 jours dans l'eau ensuite dans une solution de 4% NaCl jusqu'à le jour de l'essai.



Figure III-5: Enceinte climatique **Figure III-6:** Etuve de laboratoire

III.5. Méthodes d'essais

III.5.1. Essai de consistance(EN 196-3)

La détermination de la consistance normale d'une pâte pure de ciment, est la détermination de la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une pâte de ciment normale.

- L'appareil de Vicat (**Figure III-7**), est composé essentiellement d'un moule tronconique ($h=40$ mm $d_1= 70$ mm et $d_2= 80$ mm) et d'un piston vertical immobile, muni à son sommet d'un plateau destiné à recevoir une charge et portant un curseur de déplacement devant une règle graduée et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde de $\Phi = 10$ mm à sa sortie inférieure.
- Pour la préparation de la pâte, on verse dans le malaxeur (norme EN 196-3) la quantité d'eau préalablement déterminée par des tâtonnements successifs, lui ajouter 500g de ciment de manière à réaliser la consistance normale et remplir le moule tronconique.
- Placer la sonde perpendiculairement à la surface de la pâte, et l'immobiliser à son contact, puis l'abandonner à elle-même sans vitesse initiale.
- Procéder à la lecture de l'épaisseur de la pâte quand la sonde cesse de descendre sous son propre poids à 6 ± 1 mm au fond.
- La pâte est à consistance normale si $d= 6 \pm 1$ mm.
- Si (d) n'atteint pas cette valeur (c.à.d. $d >7$ mm ou $d < 5$ mm), il convient de refaire l'essai avec une valeur différente du rapport E/C jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la consistance.

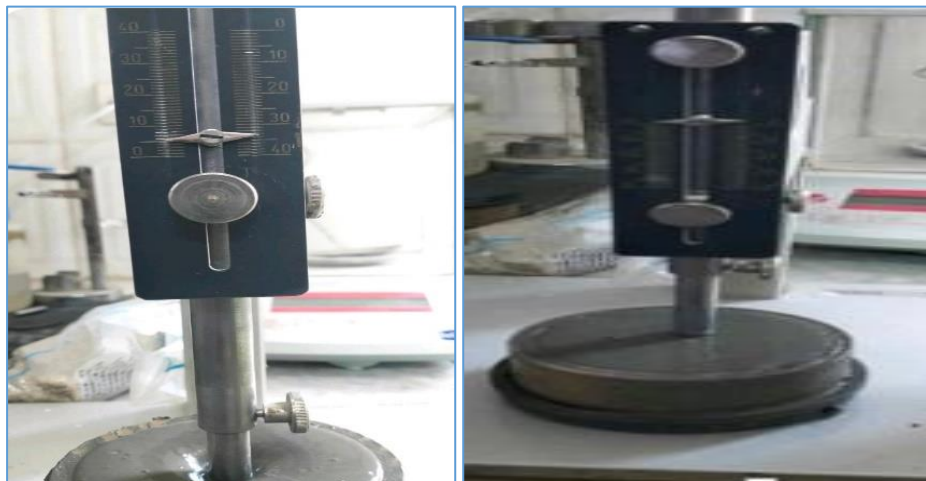


Figure III-7: Essai de consistance

III.5.2. Essai de prise(EN 196-3)

La durée de prise d'un liant est généralement caractérisée par deux temps:

- Le temps de début de prise.
- Le temps de la fin de prise

Le temps de début et de fin de prise se mesure sur une pâte pure de ciment conformément à la norme EN 196-3, à l'aide de l'appareil de Vicat équipé d'une aiguille de diamètre 1,13 mm (**FigureIII-8**).

L'essai de prise a pour but de déterminer le temps de prise (le début et la fin de prise) des pâtes de ciment afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers qui seront ensuite confectionnés. Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui s'enfonce dans le moule tronconique rempli de pâte normale.

Après avoir préparé la pâte normale, il faut remplir immédiatement le moule tronconique et agrafer la surface supérieure avec une spatule. Placer le moule rempli de pâte sous l'axe de l'aiguille, laissé descendre, cette dernière perpendiculairement à la surface et l'immobiliser à son contact, puis la relâcher sans vitesse initiale.

Le début de prise: c'est l'instant où l'aiguille de Vicat cesse de s'enfoncer et s'arrête à 4 ± 1 mm du fond du moule pour une pâte normale mesuré à partir du début du malaxage (mise en contact du liant avec l'eau de gâchage).

La fin de prise: c'est l'instant où l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0.5 mm dans la pâte.



FigureIII-8:Essai de prise

III.5.3. Essai de stabilité (l'expansion)(EN 196-3)

Ils sont effectués sur pâte normale conformément à la norme **EN 196-3**, il s'agit d'apprécier l'augmentation de volume que seraient susceptible de provoquer, au cours de la réaction d'hydratation, les oxydes de calcium ou de magnésium contenus dans le ciment.

La stabilité, est déterminée par l'observation de l'expansion volumique d'une pâte de ciment de consistance normalisée, mise en évidence par l'écartement de deux aiguilles disposées sur un moule fendu (appareil Le Chatelier).

Avant chaque essai, il faut vérifier que les deux bords de la fonte à des points quelconques des deux aiguilles n'exercent aucune pression l'un sur l'autre.

On place les moules (de forme cylindrique 30x30mm) sur des plaques en verre, les remplir en pâte pure et recouvrir chacune par une autre plaque de verre. Après le remplissage, les moules sont conservés 24 h dans la salle ou l'armoire humide. Au bout de ce temps il convient de mesurer à 0,5 mm près l'écartement A entre les pointes des aiguilles.

Le moule est alors entreposé dans le bain d'eau à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ qui doit être porté à ébullition pendant $3 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$. Soit B l'écartement entre les points des aiguilles au bout de ce temps.

Soit C l'écartement lorsque le moule, après refroidissement, est revenu à la température de 20°C . La stabilité est caractérisée par la valeur C-A exprimée en mm à 0,5 mm près (**Figure III-9**).



Figure III-9: Essai de stabilité

III.5.4. Essai de rupture par flexion (EN 196-1)

Le dispositif utilisé est un dispositif de flexion 3 points (**Figure III-10**), comportant deux appuis à section semi-cylindrique de 10mm de diamètre, distant de 100 ou 106.7 mm, sur lesquels repose l'éprouvette prismatique suivant une force latérale de moulage, et un troisième appui de même diamètre, équidistant de deux premiers et transmettant de la charge F (**Figure III-11**). Pour faire une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, deux des appuis doivent pouvoir légèrement tournés autour de leurs centres, dans le plus vertical perpendiculaire aux axes des éprouvettes. L'augmentation de la charge se fait automatiquement et la force de rupture est indiquée en KN par une aiguille supplémentaire qu'on doit remettre à zéro après chaque essai.

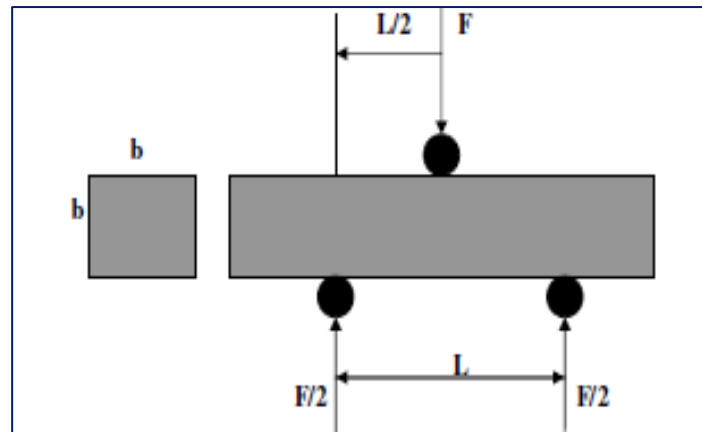


Figure III-10: Schéma mécanique de l'essai de traction par flexion trois points

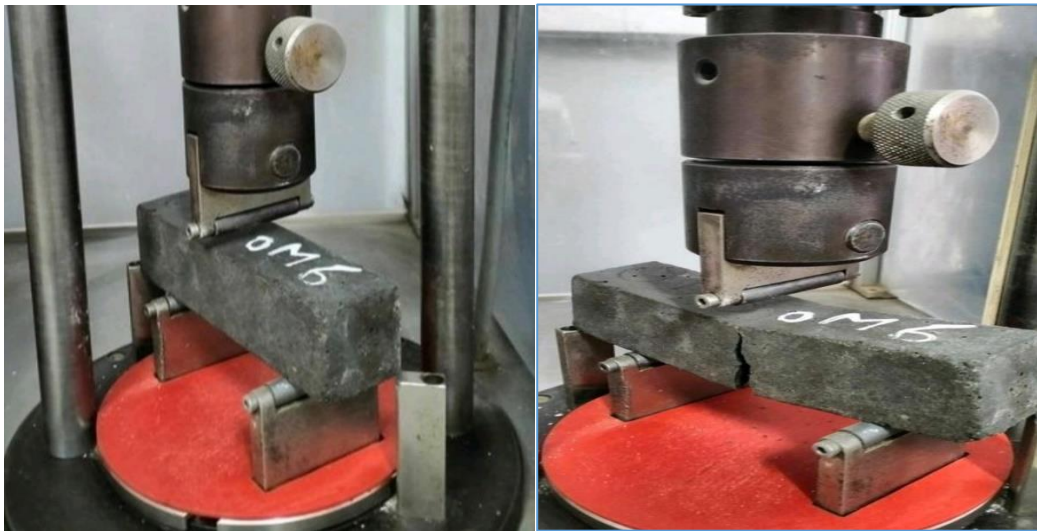


Figure III-11: Essai de traction par flexion trois points

La résistance à la traction par flexion est calculée suivant la formule:

$$R_t = 1,5Fl/b^3 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$$

F : Charge appliquée en Kg

l : Distance entre les appuis (cm)

b : Coté de l'éprouvette en cm

Les éprouvettes sont testées à : 2j, 7j, 28j et 90j, après une cure dans l'eau correspondante à l'âge des éprouvettes à tester.

III.5.5. Essai de rupture par compression (EN 196-1)

Les deux parties de l'éprouvette écrasée par l'essai de traction, sont testées en compression (Figure III-12). Chaque demi-éprouvette est soumise au test de compression sur ces faces latérales de moulage, sous une section de $4 \times 4 \text{ cm}^2$, entre deux plaques de métal dur d'au moins de 10mm d'épaisseur, de $40 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ de largeur, ces plaques

sont en carbure de tungstène, la demi-épreuve est placée entre elles de manière que son extrémité intacte dépasse d'au moins 1cm et que les arrêtes longitudinales d'éprouvettes soient perpendiculaires à celle des plaques.

Les plaques sont guidées sans frottement appréciable au cours de l'essai, de manière à avoir la même projection horizontale, l'une d'elles peut s'incliner légèrement pour permettre le contact parfait, plaque-faces d'éprouvettes (**Figure III-13**).

L'augmentation de la charge se fait automatiquement et la force de rupture est indiquée en KN par une aiguille supplémentaire qu'on doit remettre à zéro après chaque essai.



Figure III-12: Presse hydraulique de compression

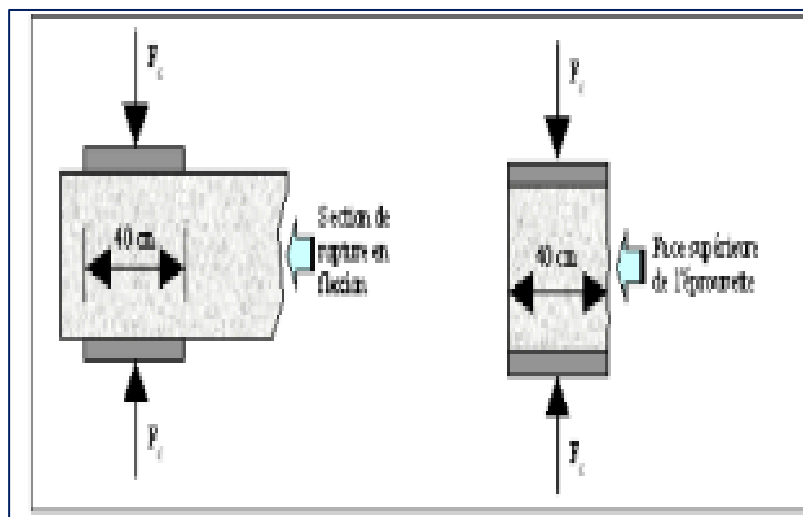


Figure III-13: Essai de compression sur éprouvette 4x4x16cm

La résistance à la compression est la moyenne arithmétique des valeurs déterminées par six essais. Cette résistance est calculée suivant la formule:

$$R_c = F/S \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$$

F : Charge appliquée en Kg

S : Section latérale de l'éprouvette égale à 16 cm²

Pareillement à l'essai de traction par flexion, les éprouvettes sont testées à: 2j, 7j, 28j et 90j, après une cure dans l'eau correspondante à l'âge des éprouvettes à tester.

III.5.6.1. Essai de retrait (NF P 15 - 433)

L'objectif de cet essai est de mesurer en fonction du temps, la variation de longueur due aux effets de l'hydratation et de la dessiccation des matériaux cimentaires.

Cet essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques équipés de plot de dimensions (4 x 4x 16 cm³) grâce à un Déformètre (**FigureIII-14**), permettant de mesurer les variations de longueur des échantillons placés dans une salle climatisée à 20 ± 1C° et à 70 ± 5% d'humidité relative, selon une condition:

- Avec échange hydrique du matériau avec l'ambiance (à l'air libre): on obtient à la fois le retrait total et la variation de masse (perte de masse),

Les mesures sont faites dans l'axe des éprouvettes, entre deux plots métalliques noyés dans le mortier au coulage qui permet le suivi de la variation de la longueur de l'échantillon (**FigureIII-15**).

L'étalonnage du Déformètre est effectué à l'aide d'une tige étalon en Invar de 160 mm de longueur qui sert de référence de mesure (**FigureIII-16**).

L'expression du retrait se traduit par le rapport de la variation de longueur de l'éprouvette (Δl) en fonction du temps et la longueur initiale de l'éprouvette(l) pour différentes échéances de temps: 1, 2, 7, 14, 21, 28, 56 et 90 jours.

Le retrait est calculé suivant la formule:

$$\text{Retrait} = \frac{\Delta l}{l}$$



Figure III-14: Déformètre Figure III-15: Mesure du retrait

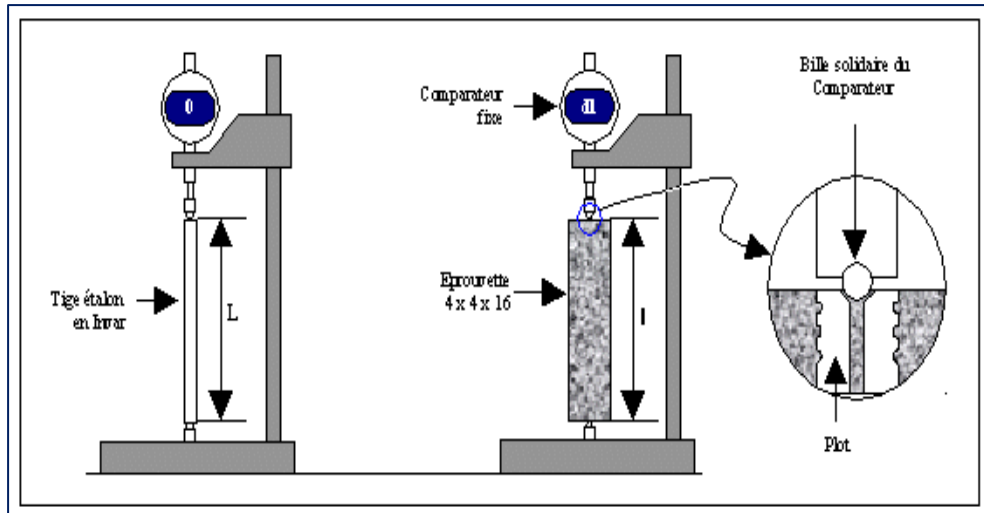


Figure III-16: Méthode de mesure de retrait et de gonflement

III.5.6.2. Mesure de la perte en poids

Les mesures de la perte en poids ont été réalisées avec une balance sur les éprouvettes destinées à la mesure du retrait (**Figure III-17**). On mesure le poids P_i de chaque éprouvette après 24 heures et le poids P_j des mêmes éprouvettes à l'âge de: 1, 2, 7, 14, 21, 28, 56 et 90 jours .La perte en poids, est calculée suivant la relation suivante:

$$\text{Perte en poids} = \frac{(P_i - P_j)}{P_i} \times 100$$



Figure III-17: Mesure du poids des éprouvettes

III.5.7. Essai d'absorption par immersion (NBN B 15-215)

L'absorption par immersion consiste à mettre les éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm³ du mortier dans l'étuve à 105 °C jusqu'à une masse constante, ensuite les immerger totalement dans l'eau à 20°C pendant une durée de 24heures c'est-à-dire jusqu'à saturation du matériau, puis les retirer et peser (**Figure III-18**).

Le coefficient d'absorption par immersion (A_b) est le résultat de la moyenne des valeurs d'essai réalisé sur plusieurs éprouvettes d'un même échantillon, donné par la formule suivante :

$$W = A_b \% = \frac{(M_h - M_s)}{M_s} \times 100$$

Avec :

M_h : Masse de l'éprouvette humide

M_s : Masse de l'éprouvette sèche

A_b : coefficient d'absorption d'eau par immersion



Figure III-18: Eprouvettes prismatiques 4x4x16 cm pour l'essai d'absorption par immersion

III.5.8. Essai d'absorption capillaire [NBN EN 125 : 1999]

Cette caractéristique reflète la quantité d'eau pouvant être absorbée par la pierre lorsqu'une seule face de l'élément est en contact avec de l'eau. Elle s'exprime par le coefficient de capillarité C g/ (m².s^{1/2}).

Les éprouvettes sont séchées à 105 °C pour en déterminer la masse sèche. Ils sont ensuite mis en contact avec 3 mm d'eau par l'une de leurs faces (figure III.19). L'évolution de la masse est suivie à intervalles réguliers et portée sur un graphique en fonction de \sqrt{t} . Généralement, cette évolution est linéaire par rapport à \sqrt{t} .

Le coefficient de capillarité (C) est alors calculé comme la pente de la droite de régression marquant la première phase d'absorption, soit :

$$C = (m_i - m_d) \times 100 / (A \times \sqrt{t})$$

m_i : la masse au temps i

m_d : la masse sèche

A : la surface en contact avec l'eau.



Figure III-19: Essai d'absorption capillaire

III.5.9. Porosité accessible à l'eau

Rapport du volume des pores d'un corps d'épreuve à son volume apparent. Elle s'exprime en pourcentage. La porosité peut être:

- Ouverte (ou accessible à l'eau), objet du présent essai;
- Fermée;
- Totale (somme des porosités ouverte et fermée).

La mesure de la porosité (**figure III.20**) selon accessible à l'eau du béton durci la norme (NF P18-459) implique la détermination par pesées des:

- M_{eau} masse apparente dans l'eau après immersion dans l'eau (pesée hydrostatique) d'un corps d'épreuve de béton préalablement imprégné à l'eau;
- M_{air} masse dans l'air libre du même corps d'épreuve imbibé;
- M_{sec} masse à l'état sec.

La porosité ouverte est calculée à partir de ces résultats.

$$\varepsilon = (M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}) \times 100 / (M_{\text{air}} - M_{\text{eau}})$$



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-20: Essai de la porosité accessible à l'eau

III.5.10. Essai d'attaque chimique par les acides et les bases (ASTM C-267-97)

Les éprouvettes destinés à l'essai de la résistance chimique sont conservés après décoffrage dans l'eau pendant 28 jours à une température de 20 ± 2 °C en suite les éprouvettes seront pesées pour déterminer leur poids initial avant l'attaque chimique, puis immergées dans une solution de 4% KOH (**Figure III-21**) et 4% NaCL (**Figure III-22**).

Les éprouvette seront pesées avec une balance de précision de 0.01g après les avoir nettoyées trois fois avec l'eau de robinet pour éliminer le mortier altéré et laissées sécher pendant 30 min, cette opération de mesure de pesées sera effectuée aux échéances 3,7,14,21, 28,56 et 90 jours, la solution d'attaque est renouvelé a sa totalité chaque 14 jours.

L'évaluation s'effectuera en mesurant la variation de la masse des échantillons suivant la formule:

$$\text{Variation de la masse (\%)} = [(M1 - M2) / M1] \times 100$$

M1: masse de l'éprouvette avant immersion

M: masse de l'éprouvette nettoyée et séchée après immersion



Figure III-21: Epreuves immergées dans la solution 4% KOH



Figure III-22: Epreuves immergées dans la solution 4% NaCl

III.6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre:

- Le programme expérimental utilisé au cours de cette étude.
- La formulation des différents mélanges des pâtes de ciment et des mortiers, les paramètres de composition ainsi que le mode de fabrication et de conservation des épreuves.
- L'ensemble des essais réalisés sur les pâtes de ciment et les mortiers ainsi que les méthodes d'essais qui se résument à :
 - Essai de consistance,
 - Essai de prise,
 - Essai d'expansion,
 - Essai de rupture par flexion (traction),

- Essai de rupture par compression,
- Essai de retrait,
- Essai d'absorption par immersion,
- Essai d'absorption par capillarité,
- Essai de porosité accessible à l'eau,
- Essai d'attaque chimique des mortiers par les acides et les bases.
- Essai pénétration des chlorures

Les résultats des essais effectués et les discussions seront présentés dans le chapitre suivant.

**Chapitre IV:
Effet des fillers recyclés sur propriétés du ciment**

IV. Effet des fillers recyclés sur propriétés du ciment

IV.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats des essais entrepris sur les pâtes de ciment et les mortiers sous formes ,d'histogrammes et de graphes qui nous permettent d'expliquer clairement les phénomènes constatés, à travers la recherche de l'influence de l'ajout recyclé sur leurs caractéristiques ,à savoir: la consistance, la prise et l'expansion. Aussi, les résultats des essais à l'état durci et de durabilité, effectués sur les mortiers (résistance en compression et en traction par flexion, résistances après traitement thermique, retrait, absorption et résistances chimiques),sont présentés et analysés. Les modifications apportées par les taux de substitution des fillers de déchets brique rouge aux propriétés d'un CEM I, sont ensuite interprétés.

IV.2.Effet des fillers recyclés sur les propriétés de la pâte de ciment

IV.2.1.Variation de la demande en eau

Dans la **FigureIV-1** on donne la variation de la demande en eau en fonction du taux de substitution.

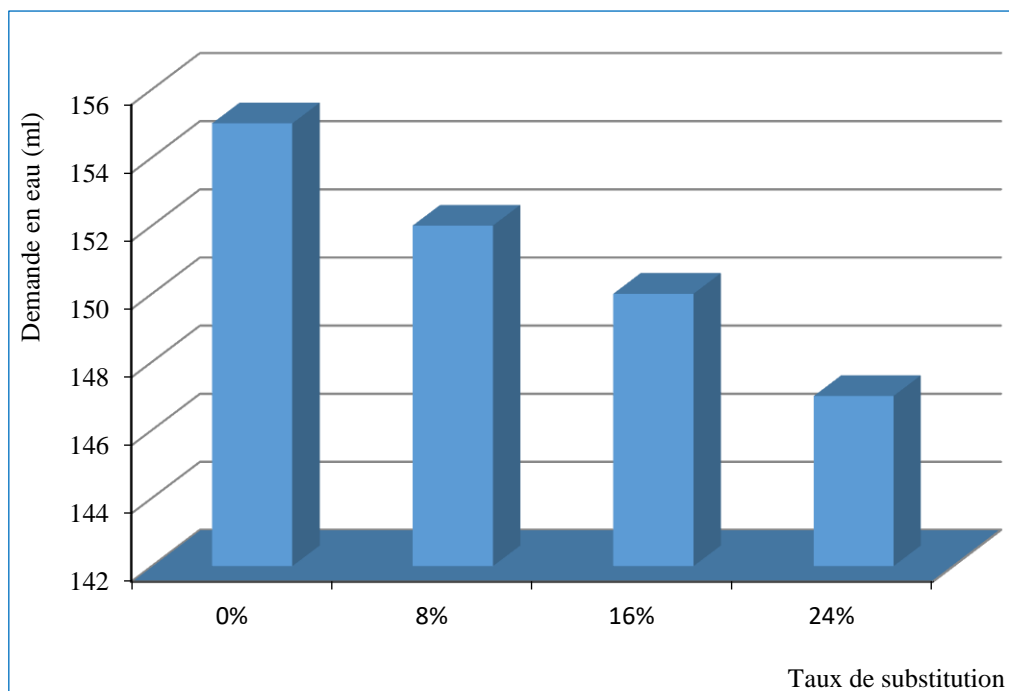


Figure IV-1: Variation de la demande en eau en fonction du taux de substitution

La **Figure IV-1**, indique la variation de la demande en eau en fonction du taux de substitution. On constate que la demande en eau diminue avec l'augmentation du taux de substitution, plus la quantité d'eau augmente plus la chaleur d'hydratation est élevée. Ces résultats sont expliqués par le fillers de brique à une surface spécifique plus grande que les particules de ciment et la teneur en matière organique (PF=9).

IV.2.2. Début de prise et fin de prise

La **Figure IV-2** indique la variation du temps de début et de fin de prise en fonction du taux de substitution.

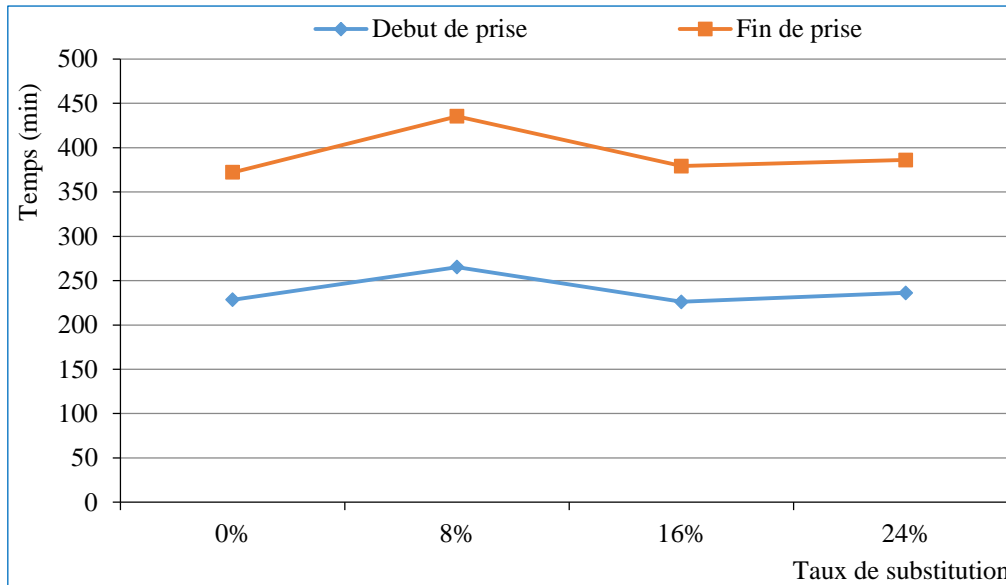


Figure IV-2: Variation du temps de début et fin de prise en fonction du taux de substitution

Le temps de début et fin de prise augmente en fonction de l'augmentation du taux de substitution du fillers de brique recyclés. Cette augmentation est due principalement à la présence de silice dans les fillers de brique recyclés. Le temps maximal de début et fin de prise est enregistré pour un taux de 8%.

IV.2.3. Stabilité

La **Figure IV-3**, indique la variation de la stabilité en fonction du taux de substitution.

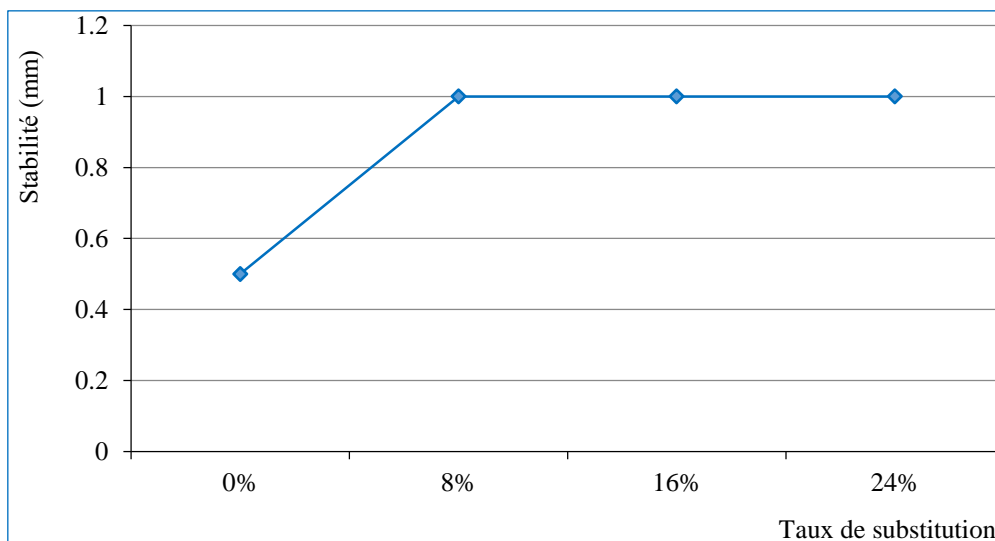


Figure IV-3: Variation de la stabilité en fonction du taux de substitution

On vérifie la stabilité à froid et à chaud pour s'assurer que les ciments ne contiennent pas des substances susceptibles de provoquer une expansion dangereuse au cours du temps. La **Figure IV-3** montre que il n'y pas d'expansion dangereuse (≥ 10) dans le ciment à cause de l'absence de la chaux libre (CaO libre = 0) et MgO est inférieur à 5%.

IV.3. Effet des fillers recyclé sur les propriétés des mortiers

IV.3.1. Résistance à la compression

La **Figure IV-4 & 5**, indique la variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge et des taux de substitution.

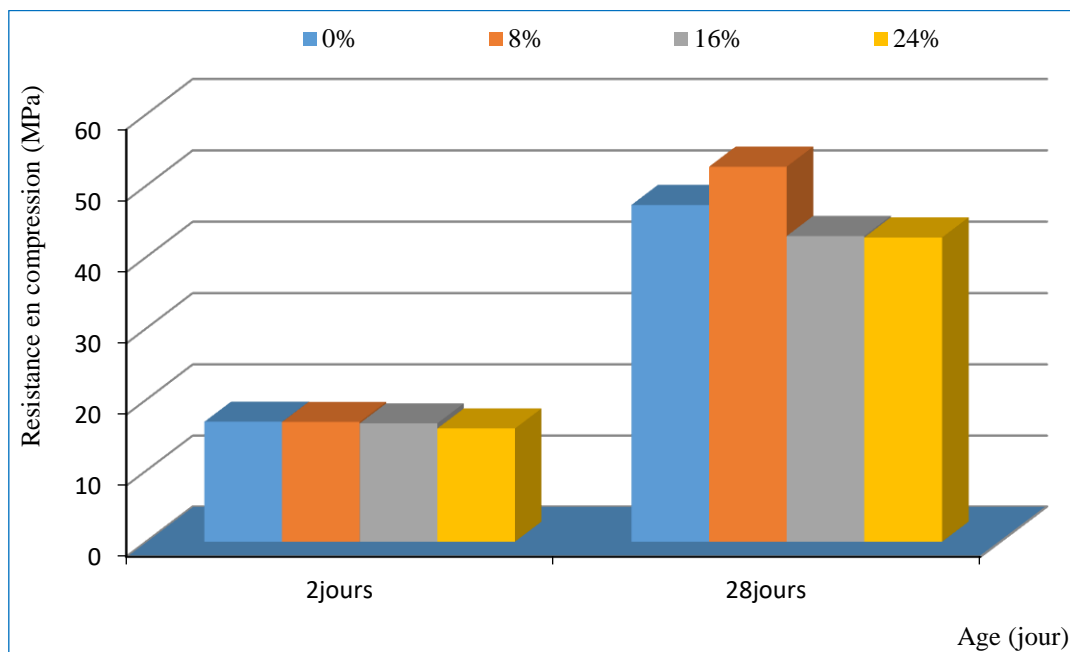


Figure IV-4: Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution

A 2 jours, l'ajout des fillers de brique recyclés comme substituant du ciment n'influe pas sur la résistance en compression. A 7 jour l'effet est plus marqué et la résistance diminue en fonction de l'augmentation du taux de substitution.

L'ajout de 8% de fillers recyclés de déchets de brique rouge entraine une augmentation de la résistance en compression par un gain de 11.33% à l'âge 28 jours.

Ces résultats sont expliqués par la présence de SiO_2 dans le brique (61.63%) qui favorise la formation de C2S qui augmente la résistance à long terme. L'introduction de 8% de brique recyclés ne change pas la classe du ciment. Au-delà de 8% les fillers de brique recyclés un effet négatif sur la résistance en compression.

D'après la **Figure IV-5**, la résistance augmente avec l'âge, la variation est plus importante entre 2et 28 jours.

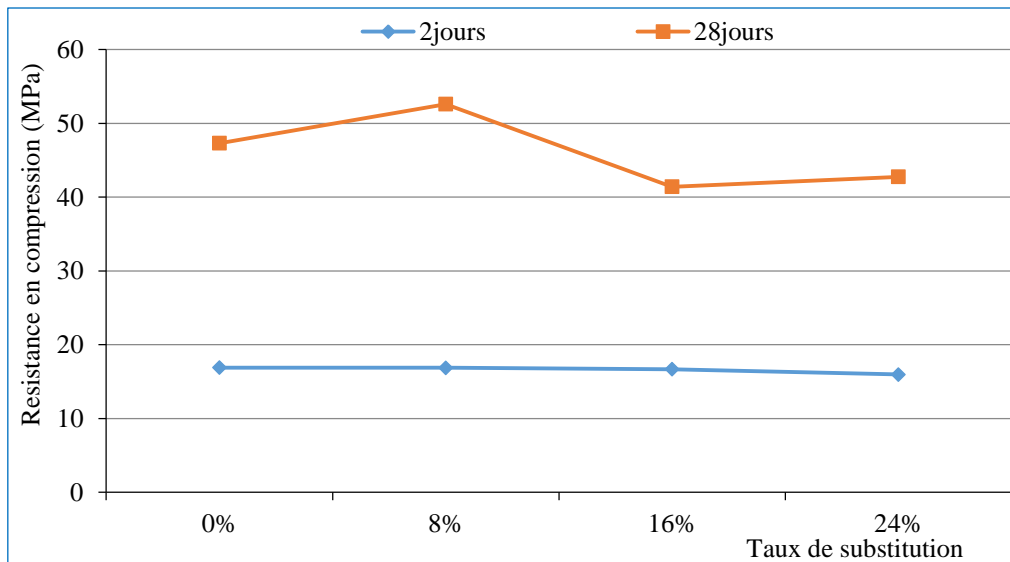


Figure IV-5: Influence de l'âge sur l'évolution de la résistance en compression

IV.3.2. Résistance à la traction par flexion

La Figure IV-6&7, indique la variation de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge et des taux de substitution.

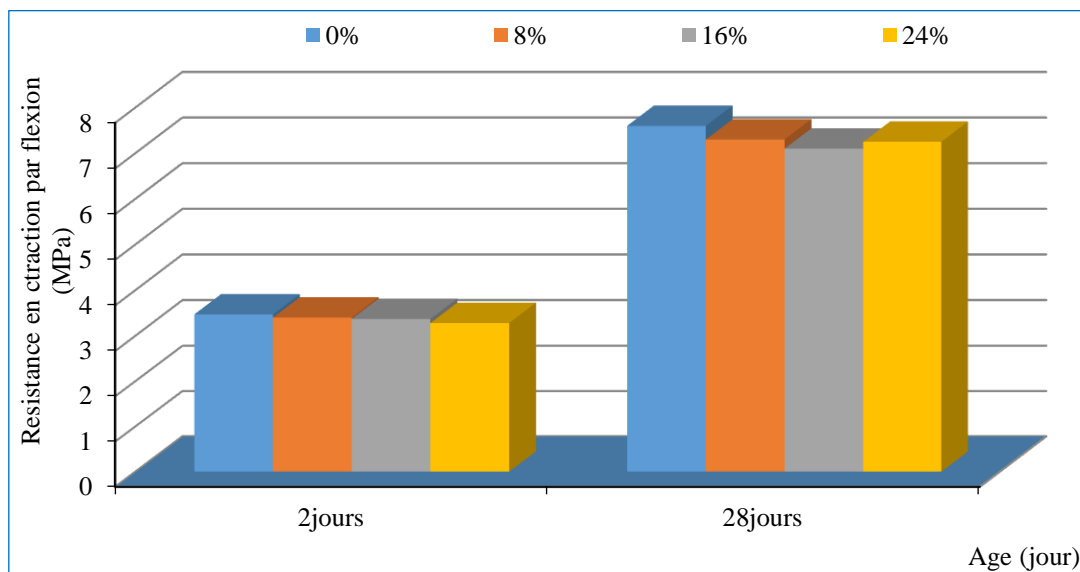


Figure IV-6: Variation de la résistance en traction par flexion en fonction du taux de substitution

D'après la Figure IV-6, on constate que la réaction d'hydratation est perturbée par l'introduction des fillers recyclés au jeune âge. A moyen et long terme le mortier témoin enregistre la meilleure résistance en traction par flexion par rapport aux autres mortiers. La résistance augmente avec l'âge.

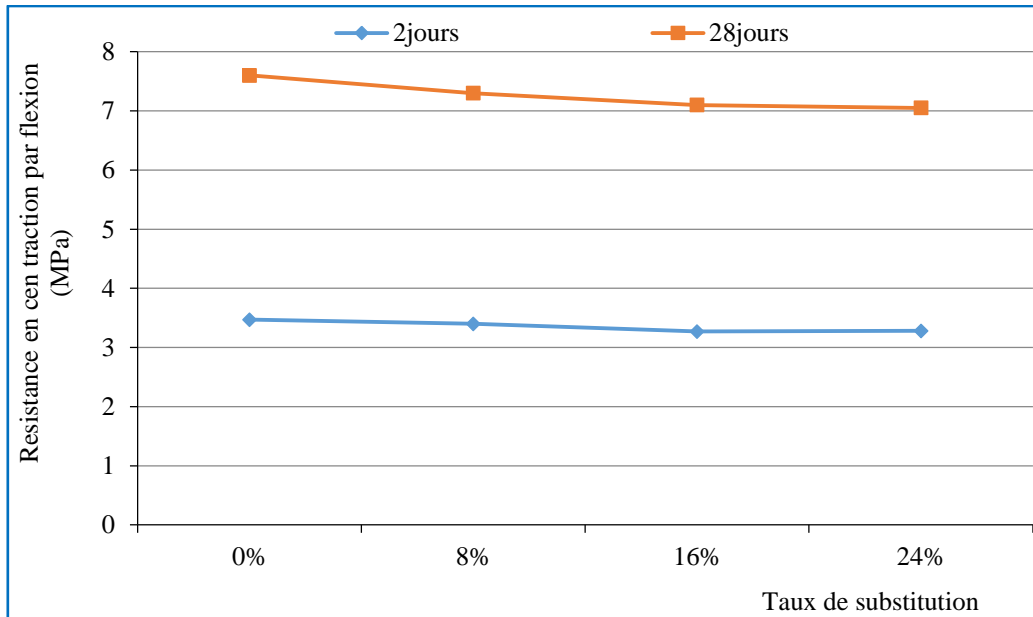


Figure IV-7: Influence de l'âge sur l'évolution de la résistance en traction par flexion

La variation des résistances entre 2 et 28 jours est plus marquée

IV.3.3. Influence de la température sur la résistance mécaniques et le poids des mortiers

a. Résistance en compression

Sur la **Figure IV-8**, on présente la variation de la résistance en compression des mortier en fonction de la température de traitement.

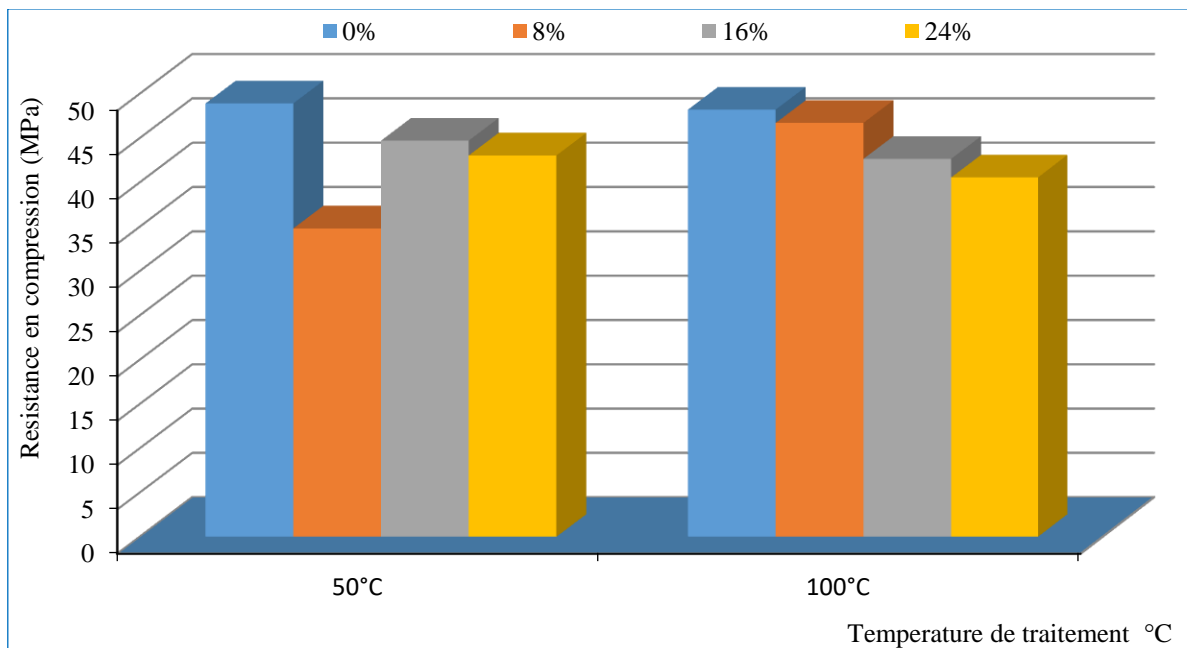


Figure IV-8: Résistance en compression à l'âge 28 jours en fonction de la température de traitement

A faible température (50 °C et 100°C), la réaction d'hydratation est accélérée ce qui explique la hausse des résistances en compression du mortier témoins.

b. Résistance en traction par flexion

Sur la **Figure IV-9**, on présente la variation de la résistance en traction par flexion des mortier en fonction de la température de traitement.

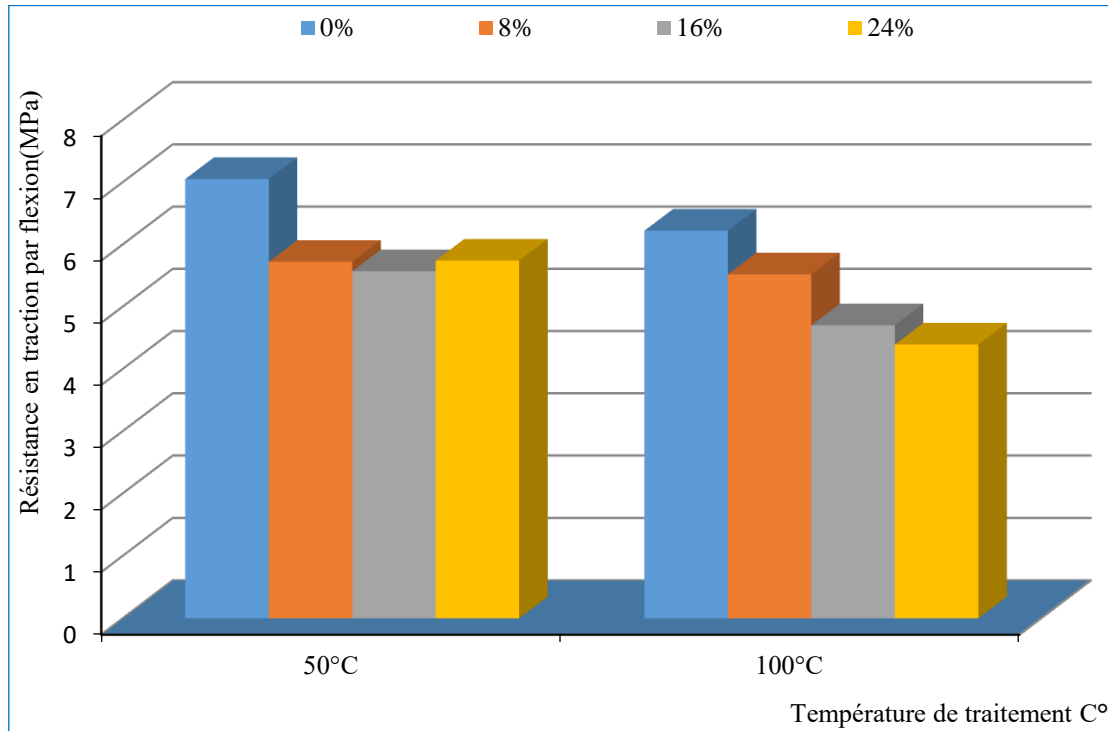


Figure IV-9: Résistance en traction par flexion a l'âge 28jours en fonction de la température de traitement

A 50°C jusqu'à 100°C, la résistance en traction par flexion est diminué et elle est maximale pour un taux de 0%.

Le traitement thermique influe négativement sur les résistances en traction par flexion mais ces résistances restent acceptables.

c. Perte en poids

Sur la **Figure IV-10**, on présente la variation des masses des mortier en fonction de la température de traitement.

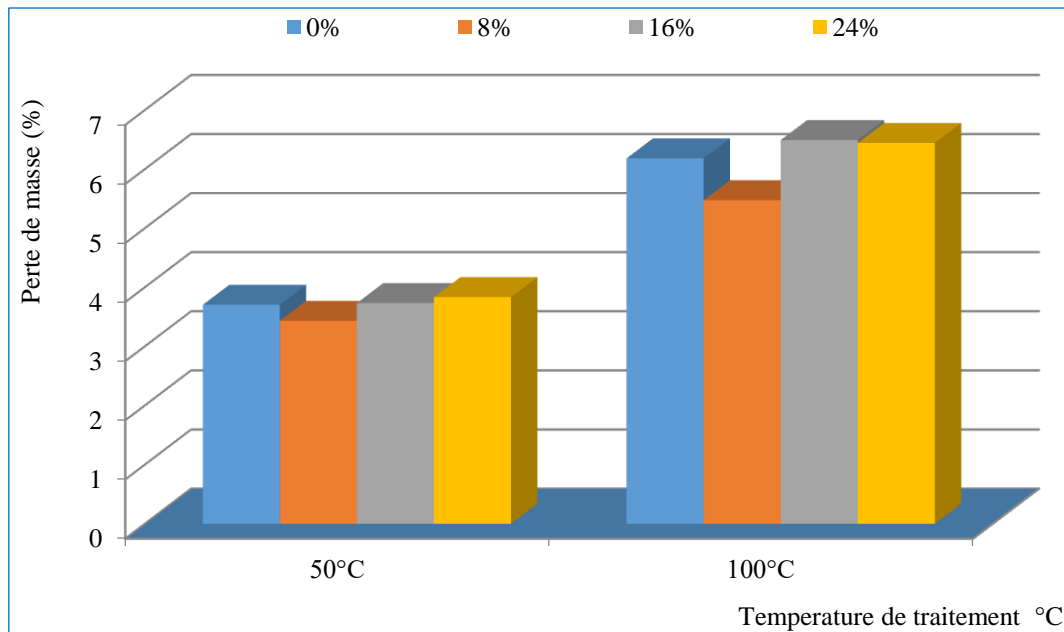


Figure IV-10: Perte de masse des mortiers à l'âge 28 jours en fonction De la température de traitement

D'une manière générale, la perte en poids des échantillons traités thermiquement augmente avec l'augmentation du taux de substitution et la température de traitement. Cette augmentation est due à l'évaporation de l'eau contenue dans les mortiers

IV.3.4. Variation dimensionnelle (retrait et perte en poids)

IV.3.4.1. Retrait et perte en poids

Les résultats des retraits obtenus sont illustrés sur les **Figures IV-11**. Le mortier de 24% de taux de substitution enregistre la valeur maximale de retrait par rapport aux autres mortiers.

Le retrait augmente avec l'âge et les valeurs minimales sont données par les mortiers de 8% et 16% de taux de substitution respectivement.

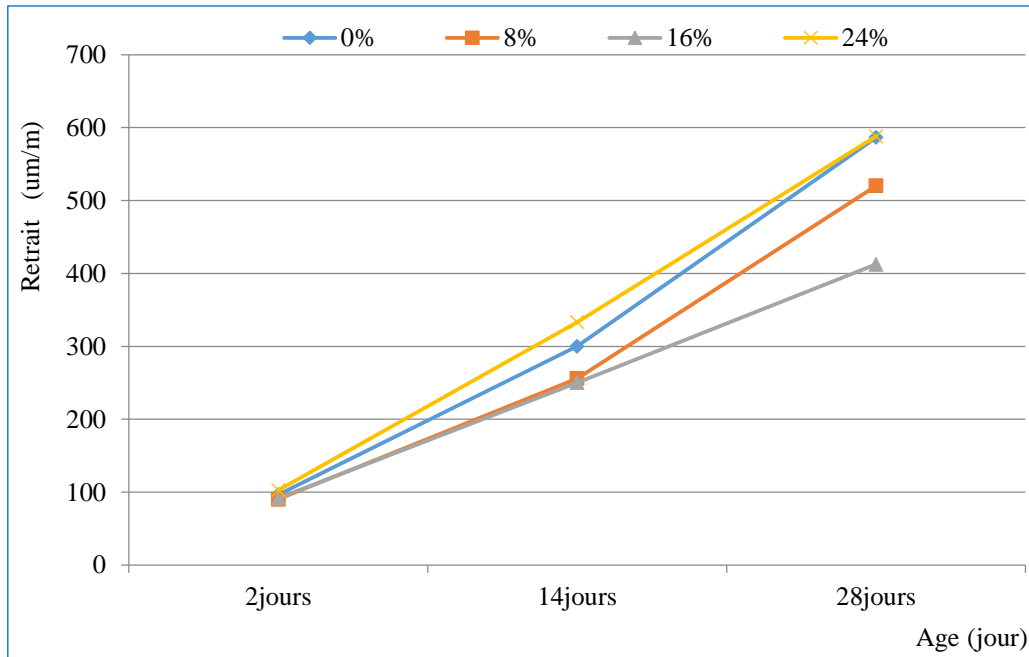


Figure IV-11: Variation du retrait total des mortiers en fonction du temps

Les résultats de la perte en masse des essais de retrait sont donnés par la Figure IV-12.

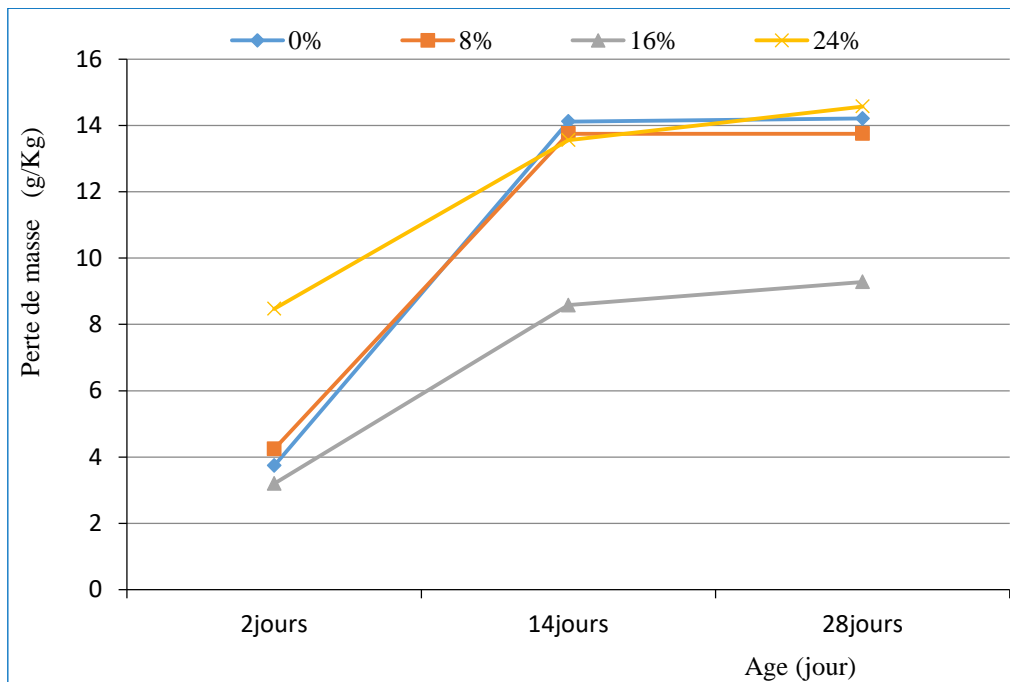


Figure IV-12: Variation de la perte en poids des mortiers en fonction du temps

L'analyse des résultats des variations dimensionnelles dues au retrait (Figure IV-12), accompagné par des pertes de masses dues à l'évaporation de l'eau en excès, cette perte de masse est minimale pour le mortier de 16% de taux de substitution.

IV.3.4.2. Gonflement et gain en poids

Les résultats des gonflements obtenus sont représentés dans la **Figure IV-13**.

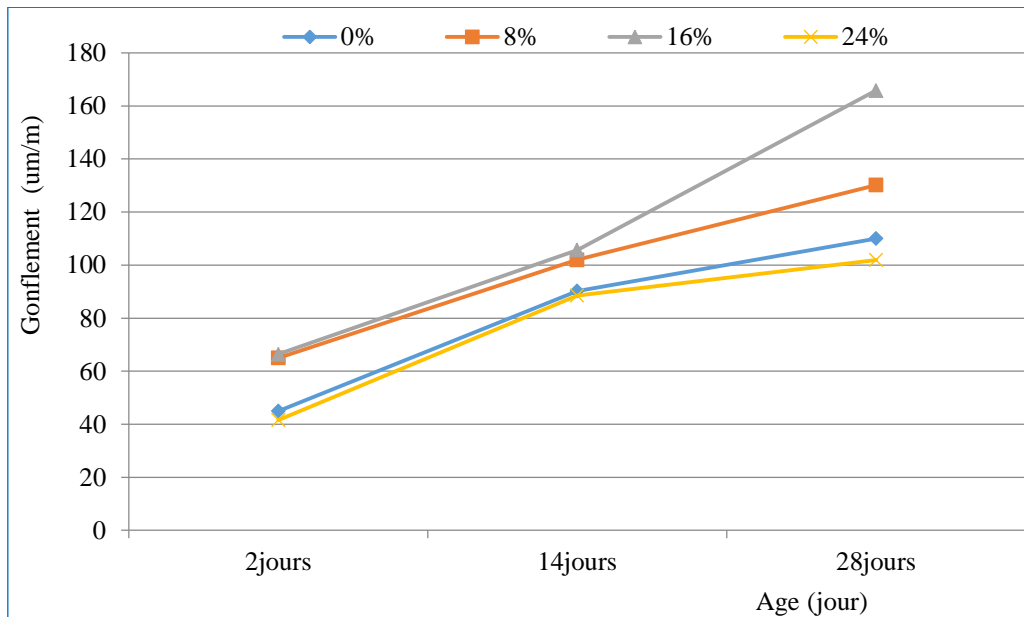


Figure IV-13: Variation du gonflement des mortiers en fonction du temps

La **Figure IV-13** indique qu'à partir du 2^{ème} jour, le remplacement partiel du ciment par l'ajout de brique recyclé engendre une augmentation du gonflement quelque soit le taux de substitution et l'âge.

La Variation du gain en poids des mortiers en fonction du temps sont illustrés sur la **Figure IV-14**.

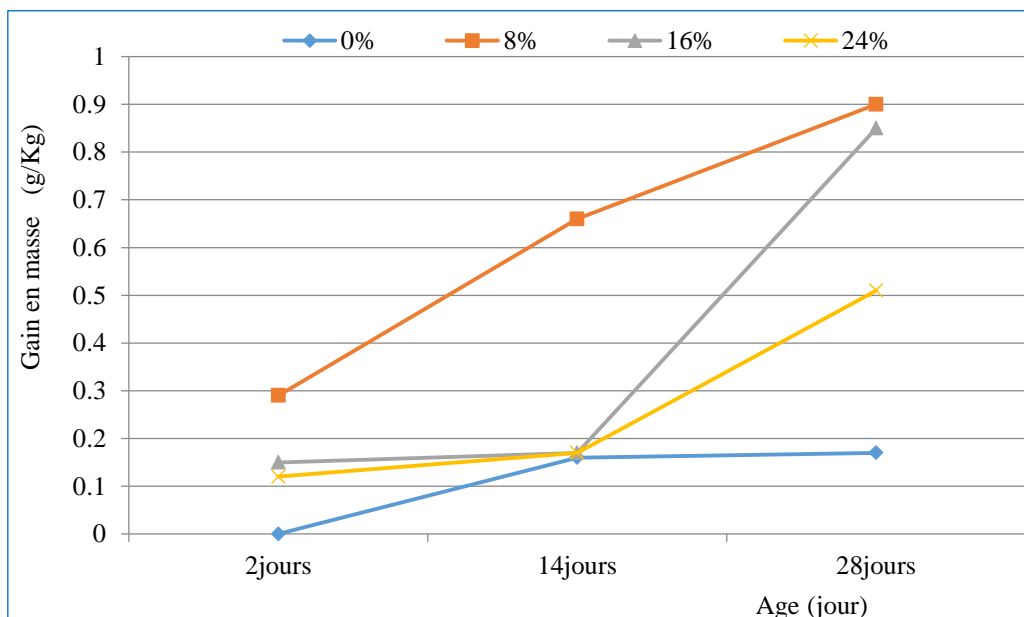


Figure IV-14: Variation du gain en poids des mortiers en fonction du temps

Les éprouvettes conservées dans l'eau subissent une augmentation des masses ce qui traduit par un gain de masse. Le plus faible gain en masse est obtenu pour le mortier de 0% de taux de substitution.

IV.3.5. Variation de l'absorption d'eau par immersion

Les valeurs du coefficient d'absorption par immersion (A_b) sont illustrées dans la **Figure IV-15**.

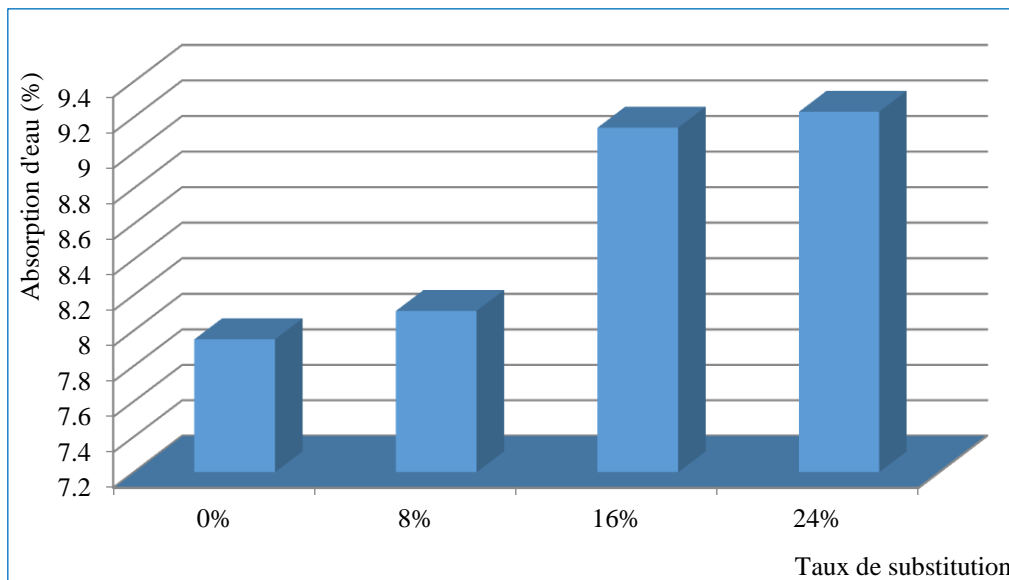


Figure IV-15: Evolution du coefficient d'absorption par immersion (A_b) en fonction du taux de substitution

L'analyse des résultats obtenus, montre que l'absorption d'eau par immersion augmente avec l'augmentation du taux de substitution des fillers recyclés, ceci est dû à la présence des matières organiques (PAF=9) et à l'absorption élevée des fillers de brique, la valeur maximale est enregistrée à un taux de 24%.

IV.3.6. Variation de l'absorption par capillarité

La **Figure IV.16** montre la variation du coefficient d'absorption par capillarité en fonction du temps.

Les courbes de l'absorption capillaire ont la même allure quelque soit le taux de substitution, elles augmentent en fonction de l'âge. La variation est très rapprochée et le mortier à base 24% de taux de substitution donne la plus forte absorption capillaire à 120 minutes.

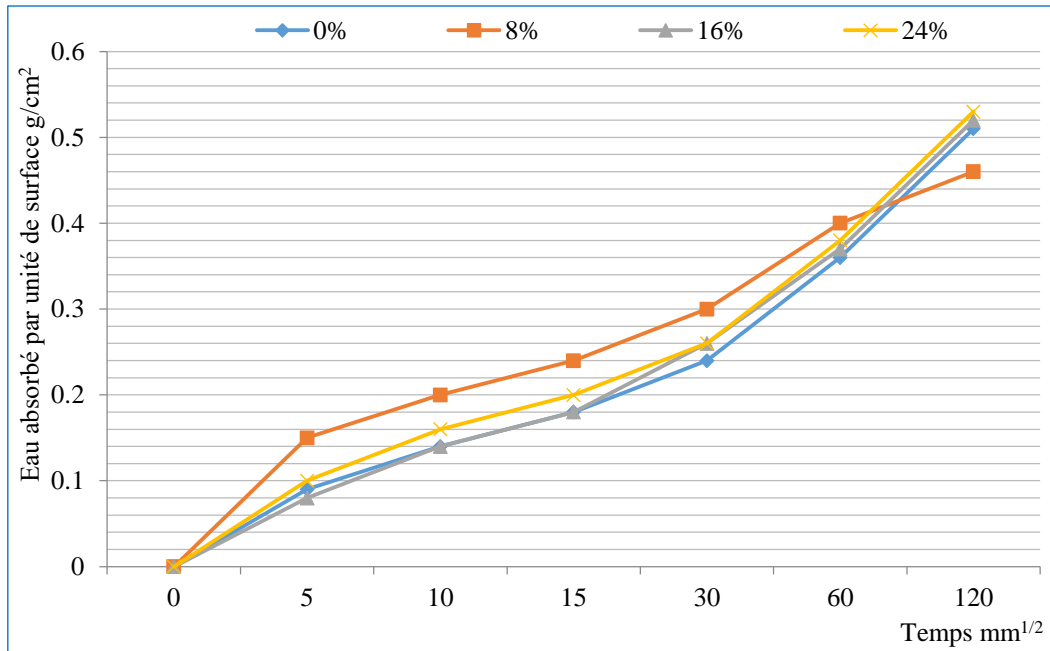


Figure IV.16: Variation de l'absorption par capillarité en fonction du temps

IV.3.7. Porosité accessible à l'eau

La Figure IV.17 donne la variation de la porosité accessible à l'eau en fonction du taux de fillers de plâtre recyclés.

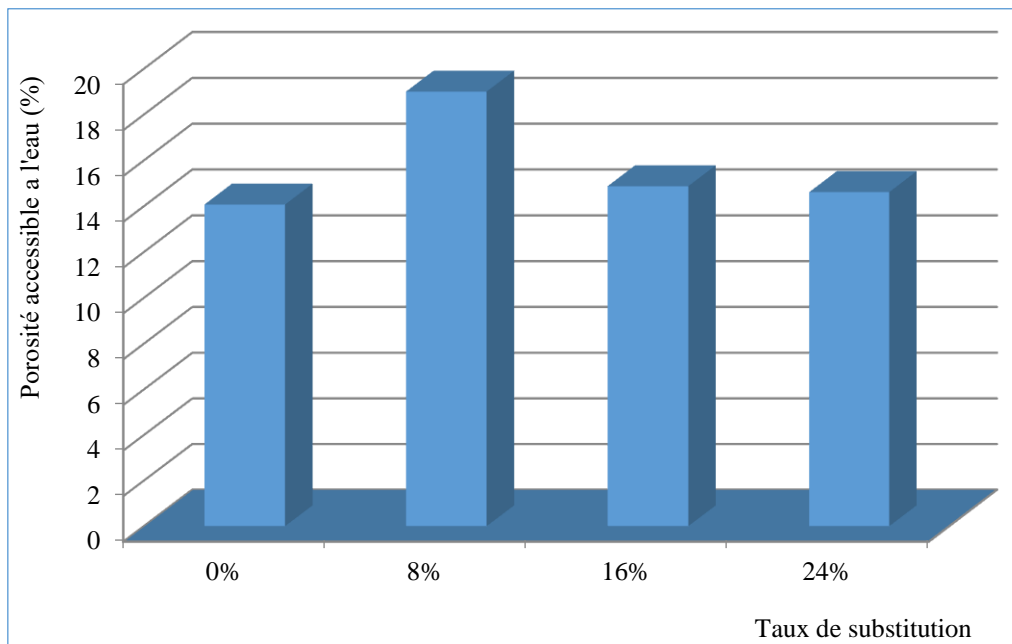


Figure IV.17: Evolution de la porosité accessible à l'eau en fonction du taux de substitution

L'ajout de fillers de brique recyclé comme addition dans le ciment conduit à une augmentation de la porosité intergranulaire du mortier alors que le taux 8% donne une

valeurs plus grande que les autres mortiers. La porosité minimale est donnée par le mortier témoins et la valeur maximale est enregistrée sur le mortier de 8% de taux de substitution.

IV.3.8. Attaque des mortiers par les acides et les bases

a. Attaque par KOH

Les résultats de l'attaque par KOH sont illustrés dans la **Figure IV-19**. Les résistances maximales sont données par les mortiers a bases des fillers recyclées et la résistance maximale sont données par le mortier de 24% de taux de substitution.

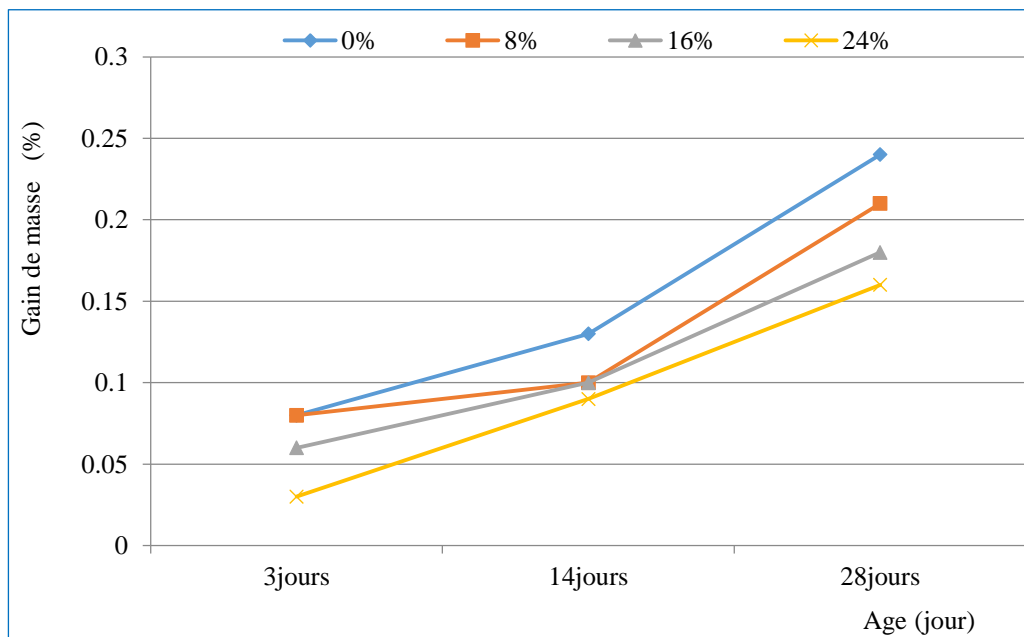


Figure IV-18: Variation de gain en poids des mortiers en fonction de la période d'immersion dans 4% de KOH

c. Attaque par NaCL

Le gain en masse des échantillons conservés dans 4% NaCL sont représentés dans la **Figures IV-19**.

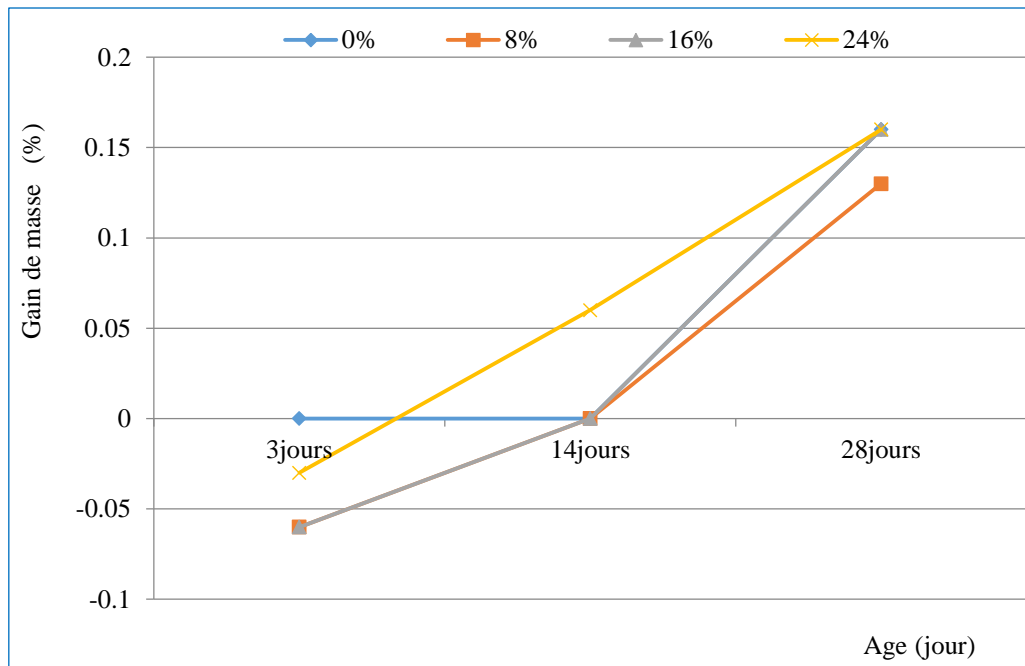


Figure IV-19: Variation de gain en poids des mortiers en fonction de la période d'immersion dans 4% de NaCl

La variation des masses des mortiers n'est pas respecté ni pour les taux de substitution ni pour l'âge. Le gain maximal est donné par le mortier de 24% .

IV.4. Conclusion

D'après cette étude on peut conclure que:

- La demande en eau diminue avec l'augmentation du taux de substitution.
- Le temps de début et fin de prise augmente en fonction de l'augmentation du taux de substitution du fillers de brique recyclés
- Le temps maximal de début et de fin de prise est obtenu dans le mortier 8% de taux de substitution.
- Il n'y pas d'expansion dangereuse dans le ciment.
- L'ajout de 8% de fillers recyclés de déchets de brique rouge entraine une augmentation de la résistance en compression
- L'introduction de 8% de fillers recyclés ne change pas la classe du ciment.
- A moyen et long terme le mortier témoin enregistre la meilleure résistance en traction par flexion par rapport aux autres mortiers.
- La résistance augmente avec l'âge.

- Le traitement thermique influe négativement sur les résistances en traction par flexion mais ces résistances restent acceptables.
- Le retrait augmente avec l'âge et les valeurs minimales sont données par les mortiers de 8% et 16% de taux de substitution respectivement.
- L'ajout de brique recyclé engendre une augmentation du gonflement quelque soit le taux de substitution et l'âge.
- La valeur maximale de l'absorption d'eau par immersion est enregistrée à un taux de 24%.
- Le mortier à base 24% de taux de substitution donne la plus forte absorption capillaire à 120 minutes.
- L'ajout de fillers de brique recyclé comme addition dans le ciment conduit à une d'augmentation de la porosité intergranulaire du mortier.
- L'absorption d'eau par immersion augmente avec l'augmentation du taux de substitution de brique recyclé.
- Les mortiers contenant des fillers recyclés de déchets de brique donnent les meilleures résistances à la solution KOH.

Conclusions générales

Conclusions générales

Les travaux de recherche de la présente mémoire ont été menés dans le but d'atteindre deux principaux objectifs, le premier concerne la valorisation des déchets de brique, le deuxième objectif est d'étudier l'influence des déchets de brique recyclés sur le comportement mécanique et sur la durabilité du matériaux cimentaires en substitue le volume de ciment par des ajouts recyclées de brique selon des pourcentages allant du 0%, 8%, 16%, 24%.

Les résultats obtenus nous permettent de tirer les conclusions suivantes:

- La demande en eau diminue avec l'augmentation du taux de substitution.
- Le temps de début et fin de prise augmente en fonction de l'augmentation du taux de substitution du fillers de brique recyclés
- Le temps maximal de début et de fin de prise est obtenu dans le mortier 8% de taux de substitution.
- Il n'y pas d'expansion dangereuse dans le ciment.
- L'ajout de 8% de fillers recyclés de déchets de brique rouge entraine une augmentation de la résistance en compression
- L'introduction de 8% de fillers recyclés ne change pas la classe du ciment.
- A moyen et long terme le mortier témoin enregistre la meilleure résistance en traction par flexion par rapport aux autres mortiers.
- La résistance augmente avec l'âge.
- Le traitement thermique influe négativement sur les résistances en traction par flexion mais ces résistances restent acceptables.
- Le retrait augmente avec l'âge et les valeurs minimales sont données par les mortiers de 8% et 16% de taux de substitution respectivement.
- L'ajout de brique recyclé engendre une augmentation du gonflement quelque soit le taux de substitution et l'âge.
- La valeur maximale de l'absorption d'eau par immersion est enregistrée à un taux de 24%.
- Le mortier à base 24% de taux de substitution donne la plus forte absorption capillaire à 120 minutes.
- L'ajout de fillers de brique recyclé comme addition dans le ciment conduit a une d'augmentation de la porosité intergranulaire du mortier.
- L'absorption d'eau par immersion augmente avec l'augmentation du taux de substitution de brique recyclé.

-Les mortiers contenant des fillers recyclés de déchets de brique donnent les meilleures résistances à la solution KOH.

References bibliographiques

References bibliographiques

1. Espace de l'université ibn khaldoun de tiaret.
2. Les matière de l'industrie cimentaire .
3. Développement des ajouts pour économi du clinker et ciment (Mohamed Arfi université de Blida SAAD DAHLAB)
4. Tecgnique de l'ingénieur infociment.
5. Scribd.
6. Accademie journal of civil engineering.
7. Science des materiaux de construction (MR : Ghomari Fouad univ Aboubaker belkaid département génie civil).