

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

HAYOUNE ANOUAR

Thème

ELABORATION D'UN ECO-MATERIAUX A BASE DES MATERIAUX RECYCLES

Soutenue le: **29/06/2024**

Devant le jury composé de:

Présidente

Encadreur

Co-Encadreur

Examineur

Mouats Wassila

Hebhoub Houria

Boughamsa Wassila

Abdelouahed Assia

MCA

Pr

MCA

MCA

Université de Skikda

Université de Skikda

Université de Skikda

Université de Skikda

Promotion: 2023-2024

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui m'ont soutenu tout au long de la réalisation de ce mémoire de fin d'étude. Leur soutien précieux et leur encouragement ont été essentiels pour atteindre ce résultat.

Tout d'abord, je remercie sincèrement **Pr Hebhoub Houria**, ma directrice de mémoire, pour ses conseils éclairés, son expertise et sa disponibilité tout au long de ce projet. Ses précieuses suggestions ont grandement enrichi ce travail et m'ont permis de progresser.

Je suis également reconnaissant envers **Dr Boughamsa Wassila**, pour ses précieux conseils et son soutien constant. Ses remarques constructives qui ont joué un rôle crucial dans l'amélioration de ce mémoire.

Je tiens aussi remercier **Dr Mouats Wassila et Dr Abdelouahed Assia** d'avoir accepté d'être membres du jury de soutenance.

Un grand merci à mes proches et à ma famille pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements et leur patience durant cette période d'étude intense. Leur présence et leur compréhension ont été une source de motivation inestimable.

Enfin, je souhaite exprimer ma reconnaissance envers tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire. Leur collaboration et leur implication ont été essentielles à sa réussite.

Je suis profondément reconnaissant envers chacune de ces personnes pour leur aide précieuse et leur soutien constant.

Désignation	Page
<u>CHAPITRE I</u> : Recherche bibliographique.	
I.1. Introduction	04
I.2. Maçonnerie	04
I.2.1. Introduction	04
I.2.2. Considérations générales	04
I.2.3. Domaine d'application	04-05
I.2.4. Maçonnerie en agglomères de béton	05-08
I.2.5. Maçonnerie en briques d'argile cuite	08-10
I.2.6. La maçonnerie et les principaux matériaux utilisés	10-11
I.2.7. Conclusion	11
<u>CHAPITRE II</u> : Caractérisation des matériaux.	
II.1. Introduction	13
II.2. Caractérisation des matériaux	13
II.2.1. Ciment	13-15
II.2.2. Fillers du plâtre recyclé	15-16
II.2.3. Sable	17-21
II.2.4. Eau de gâchage	21
II.3. Conclusion	22
<u>CHAPITRE IV</u> : Effet des fillers recyclés sur propriétés du bloc.	
III.1. Introduction	24
III.2. Programme expérimental	24-25
III.3. Formulation des mélanges	25
III.4. Fabrication des mélanges	25-28
III.5. Méthodes d'essais	28
III.5.1. Essais à l'état frais :	28
a. Essais d'affaissement [NF P18-451]	28-29
b. Mesure de la densité	29-30
III.5.2. Essais à l'état durci	
a. Essai de rupture par flexion (EN 196-1)	30-31
b. Essai de rupture par compression (EN 196-1)	31-33
c. Essai de retrait (NF P 15 - 433)	04
d. Mesure de la perte en poids	33-34
e. Essai d'absorption par immersion (NBN B 15-215)	34-35
f. Essai d'absorption capillaire [NBN EN 1925 : 1999]	35-36
g. Porosité accessible à l'eau	36
h. Essai d'attaque chimique par les acides et les alcalins (ASTM C- 267-97)	36-37
i. Résistance à l'abrasion	37-40
III.6. Conclusion	40-41
	41-42

CHAPITRE IV : Effet des fillers recyclés sur propriétés du bloc.	
IV.1. Introduction	44
IV.2. Effet des fillers recyclés sur les propriétés a l'état frais	44
IV.2.1. Densité	44
IV.2.2. Ouvrabilité	44-45
IV.3. Effet des fillers recyclé sur les propriétés a l'état durci	45
IV.3.1. Densité à l'état durci	45
IV.3.2. Résistance à la compression	46
IV.3.3. Résistance à la traction par flexion	46-47
IV.3.4. Résistance en compression obtenue par scléromètre	47
IV.3.5. Vitesse ultrasonique	48
IV.3.6. Influence de la température sur la résistance mécaniques et le poids des mortiers	48
A- Résistance en compression	48-49
B- Résistance en traction par flexion	49-50
C- Perte en poids	50
IV.3.7. Variation dimensionnelle (retrait et perte en poids)	50
IV.3.7.1. Retrait et perte en poids	50-51
IV.3.7.2. Gonflement et gain en poids	52
IV.3.8. Variation de l'absorption d'eau par immersion	53
IV.3.9. Variation de l'absorption par capillarité	53
IV.3.10. Porosité accessible à l'eau	53-54
IV.3.11. Résistance à l'abrasion	54
IV.3.12. Attaque des composites par les acides et les bases	55
A- Attaque par CH ₃ COOH	55-56
B- Attaque des par KOH	57-58
C- Attaque des par NaCl	59-60
IV.4. Conclusion	61

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II-1: Composition chimique et minéralogique du ciment CEM I 52.5R	15
Tableau II-2: Propriétés physiques et mécaniques du CEM I 52.5R	15
Tableau II-3: Composition chimique et minéralogique du plâtre recyclé	16
Tableau II-4: Résultats d'analyse granulométrique du sable	17
Tableau II-5: Masse volumique apparente du sable	18
Tableau II-6: Masse volumique absolue des granulats	19
Tableau II-7: Essai au Bleu de Méthylène	19
Tableau II-8: Equivalent de sable des granulats	20
Tableau II-9: Absorption d'eau du sable	21
Tableau II-10: Analyse chimique des granulats	21
Tableau II-11: Analyse chimique de l'eau	21

Chapitre III

Tableau III-1: Différentes formulations	24
Tableau III-2: Les paramètres et les essais effectués	25
Tableau III-4: Composition des mélanges	25

Résumé

Le recyclage du plâtre mis en jeu 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 plâtre et voir la possibilité de son réintroduction dans la fabrication d'un eco-matériau comme ajout.

Afin d'atteindre notre objectif nous avons procédé à la récupération de déchets de plâtre disponibles (déchet de plâtre de construction) et utilisé comme fillers remplace partiellement un ciment blanc.

Pour réaliser ce travail nous avons introduit les fillers de plâtre recyclés avec des taux de substitution de 6, 12 et 18% et étudié les propriétés à l'état frais (densité et ouvrabilité) et les performances mécaniques sur mortier à l'état durci (résistance en compression et en traction par flexion avant et après traitement thermique à 50, 100, 150, 200, 250 et 300 °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 obtenus par des échantillons de références de 0% de taux de substitution.

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible d'introduire les déchets de plâtres comme ajout cimentaire dans la formulation d'un éco-matériau.

Mots clés: Eco-matériau, ajout, recyclage, déchets de plâtre, propriétés, performances, traitement thermique, durabilité.

ملخص

تؤدي إعادة تدوير الجص إلى جانبيين رئيسيين ، اقتصادياً وبيئياً ، مما يقلل من سعر التكلفة مع الحفاظ على الطبيعة من خلال الكميات الكبيرة من النفايات الضخمة التي يمكن استعادتها.

من خلال هذا العمل التجريبي حاولنا المساهمة في استعادة مخلفات الجبس وإمكانية إعادة إدخالها في صناعة الأسمت كإضافة.

من أجل تحقيق هدفنا ، شرعنا في استعادة نفايات الجص المتاحة (نفايات جص البناء) واستخدمنا كمواد مألوفة لاستبدال الأسمت الأبيض جزئياً .

لتنفيذ هذا العمل ، أدخلنا حشوات الجص المعاد تدويرها بمعدلات إحلال 6 و 12 و 24% ودرسنا الخصائص على المعجون الطازج (الطلب على الماء ، الإعداد والثبات) والأداء الميكانيكي على الملاط. مقاومة الشد عن طريق الانحناء قبل وبعد المعالجة الحرارية عند 150 و 300 درجة مئوية) ودرسنا أيضاً معايير المتانة وهي (امتصاص الماء عن طريق الغمر والشعيرات الدموية ، المسامية التي يمكن الوصول إليها للماء ، تغيرات الأبعاد والهجمات الكيميائية بكلور الهيدروجين بنسبة 5% ثم مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها من خلال العينات المرجعية بمعدل استبدال 0%.

النتائج التي تم الحصول عليها تكمن في أنه من الممكن إدخال نفايات الجص كإضافة اسمنتية

الكلمات المفتاحية: الأسمت ، الإضافة ، التدوير ، نفايات الجبس ، الخصائص ، الأداء ، المعالجة الحرارية ، المتانة

Abstract

The recycling of plaster brings into play two major aspects, economic and environmental, reducing the cost price while preserving nature through the high tonnages of bulky waste that can be recovered.

Through this experimental work, we have tried to contribute to the recovery of plaster waste and see the possibility of its reintroduction in the manufacture of cement as an addition.

In order to achieve our objective, we proceeded to the recovery of available plaster waste (construction plaster waste) and used as fillers to partially replace a white cement.

To carry out this work, we introduced recycled plaster fillers with substitution rates of 6, 12 and 24% and studied the properties on fresh paste (water demand, setting and stability) and the mechanical performance on mortar. in the hardened state (compressive and tensile strength by bending before and after heat treatment at 150, 300 and °C) and we also studied the durability parameters, namely (water absorption by immersion and capillary, porosity accessible to water, dimensional variations and chemical attacks by 5% HCL) then compared the results obtained by reference samples with 0% substitution rate.

The results obtained lie that it is possible to introduce plaster waste as a cementitious addition.

Keywords: Cement, addition, recycling, plaster waste, properties, performance, heat treatment, durability.

Introduction générale

L'Algérie est un pays en développement, ce qui augmente le taux de déchets générés par les acteurs économiques. La prise en charge des déchets est parmi les priorités inscrite par les pouvoirs publics, d'autant plus que les déchets peuvent être injecter directement dans plusieurs domaines, notamment le secteur de la construction, qui s'intéresse de plus en plus à la valorisation des déchets, vu l'obligation de la prise en charge des déchets par la réglementions en vigueur, et l'importance économique, environnementale ainsi que technique que certains déchets inertes (plâtre, plastique, verre, produits céramiques.....etc.) peuvent apporter au secteur de la construction, bien entendu, des mesures doivent être pris en compte en amant, entre autres; l'étude des propriétés des déchets afin de bien cerner leur utilisation.

La recherche actuelle sur les matériaux s'intéresse au développement de nouveaux composites et matériaux de construction, dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques, physiques et durabilité de ces matériaux.

Le plâtre est un matériau de construction largement utilisé dans les travaux de finition des constructions, connu pour ses qualités, qui lui permettent une demande croissante dans le marché de la construction, c'est un matériau favorable à la protection de l'environnement, très malléable, de faible densité, aussi son isolation thermique et phonique, régulateur de l'hygrométrie des enceintes), décoratif, ... Ce qui rend l'intérêt croissant à ce matériau.

L'industrie du plâtre génère des quantités importantes de déchet, la valorisation de ces déchets comme ajouts cimentaire dans la composition d'un Eco matériau devient une solution très importante qui permet de réutiliser les déchets d'une part et protéger l'environnement d'autre part.

Dans ce contexte s'inscrit ce travail qui vise la valorisation des déchets de plâtre comme ajout substitué partiellement un ciment d'un Eco-matériau destiné à la fabrication des blocks de maçonnerie. Pour réaliser cette étude nous avons substitué un ciment blanc par des fillers de plâtre recyclés généré par la démolition des constructions avec des taux de 6, 12 et 18% et étudié les modifications apportés par cet ajout sur les propriétés de l'Eco-matériau.

Les objectifs visés par cette étude sont:

- Produire un nouveau matériau,
- Développer des nouveaux matériaux esthétique et résistant à l'incendie,
- Réduire la mise en décharge et donner une seconde vie à nos déchets,
- Recyclages des déchets d'où la protection de l'environnement.

Le 1^{er} chapitre aborde une synthèse bibliographique sur la maçonnerie, définition, domaine d'application, type de maçonnerie et les différents types des matériaux utilisé dans la maçonnerie. Il aborde également la valorisation du plâtre recyclé dans matériaux de remplissage

Le 2^{eme} chapitre porte sur la caractérisation des matériaux utilisés, le sable, le ciment, les fillers de plâtres recyclées et l'eau de gâchage.

Le 3^{ème} chapitre illustre le programme expérimental, la formulation des mélanges, les méthodes d'essais à l'état frais et durci conformément aux normes en vigueur, puis au choix et à la description des modes opératoires employés.

Le 4^{ème} chapitre expose l'effet des fillers recyclés, utilisées en substitution partielle de ciment à différents dosages (0, 6, 12 et 18%) sur les propriétés de l'Eco-matériau à l'état frais et durci. Ensuite, la présentation des résultats et discussions des essais vis-à-vis des performances mécaniques avant et après traitement thermique et de durabilité des dits mortiers face aux différentes ambiances étudiées (agressions par l'acide et les bases, absorption capillaire et par immersion, variation dimensionnelle).

Enfin, on termine par des conclusions générales.

CHAPITRE I

Recherche bibliographique

I. Recherche bibliographique

I.1. Introduction

Dans cette première partie, nous la consacrons à la synthèse bibliographique sur la maçonnerie, définition, domaine d'application, type de maçonnerie et les différents types des matériaux utilisés dans la maçonnerie. On aborde également la valorisation du plâtre recyclé dans matériaux de remplissage.

I.2. Maçonnerie

I.2.1. Introduction

On appelle maçonnerie un ouvrage composé de matériaux (blocs béton, briques, pierres, etc.) unis par un liant (mortier, ciment, plâtre, etc.), le plus souvent dans le but de construire un mur. La maçonnerie est considérée comme la technique de construction la plus ancienne et la plus répandue. En effet, comme elle n'utilise pour l'essentiel que des petits éléments, elle ne nécessite pas de moyen de manutention important sur le chantier. Elle est donc applicable par toutes les entreprises, et en particulier par l'artisan maçon qui réalise d'ailleurs la plupart des constructions pavillonnaires. [1]

I.2.2. Considérations générales

Les principaux matériaux dont on dispose pour la construction des murs sont: la pierre naturelle, les agglomères de béton, la brique d'argile cuite. A part quelques pierres naturelles, tous les matériaux utilisés pour la construction des murs sont anisotropes, ce qui signifie qu'ils possèdent des caractéristiques différentes selon la direction des sollicitations.

I.2.3. Domaine d'application

Les ouvrages courants de maçonnerie traditionnelle peuvent être classés suivant leur rôle dans l'ouvrage:

- Maçonneries porteuses;
- Maçonneries de remplissage;
- Maçonneries de façade non porteuse ou en doublage;
- Maçonneries de cloison.

On distingue deux conceptions traditionnelles de murs en maçonnerie:

***Murs à simple paroi**

Ils ne comportent qu'une paroi de maçonnerie, enduite ou non:

-Murs simples dont la paroi est constituée, dans le sens de l'épaisseur, par un seul matériau principal.

-Murs composites dont la paroi est constituée, dans le sens de l'épaisseur, par plusieurs matériaux principaux (enduits non compris), solidarises de façon continue par du mortier ou du béton.

***Murs à double paroi**

Ils comportent deux parois distinctes qui peuvent être:

- D'épaisseurs sensiblement égales : ce sont les murs doubles.
- D'épaisseurs nettement inégales: ce sont les murs avec doublage (fig. 5), dits également murs avec cloison de doublage.

I.2.4. Maçonnerie en agglomères de béton

Vers la fin du XIX^{ème} siècle, les premiers blocs béton sont réalisés manuellement. Les premières machines apparaissent aux environs de la première guerre mondiale, avec une cadence de fabrication assez lente. Aujourd'hui la production est entièrement automatisée, depuis l'asservissement de la centrale à béton jusqu'à la palettisation. Le bloc est le produit le plus utilisé pour la construction des murs de maçonnerie [2].

Les agglomères de béton sont appelés communément dans certaines régions, agglos, parpaings, moellons, ou plots de béton. L'ensemble des blocs correspond à 2 grandes familles:

- Les blocs traditionnels qui font l'objet de normes;
- Les blocs non traditionnels;

La maçonnerie d'agglomères est particulièrement employée pour l'exécution des murs de façades, ainsi que pour les murs de refend. Les agglomérés pleins lourds, sont utilisés pour la construction des murs intérieurs devant offrir une certaine résistance mécanique et phonique, tandis que les agglomérés creux seront de préférence utilisés pour les murs de façades (meilleure isolation thermique).

Le cloisonnement exigeant des qualités d'isolation phonique, peut être réalisé par des agglomérés pleins de faible épaisseur. Généralement peu hygroscopique, l'agglomère de béton normal se comporte favorablement en milieu humide. De plus, cette maçonnerie reçoit généralement un crépissage, ou un enduit, destiné à protéger les éléments constitutifs et à améliorer l'aspect extérieur.

a. Les blocs traditionnels

Les blocs traditionnels peuvent être classés de différentes manières:

*Selon la nature du matériau constitutif:

- Béton de granulats (**Figure I-1**) courants (masse volumique réelle du béton constitutif $> 1700 \text{ kg/m}^3$)
- Béton de granulats légers (masse volumique réelle du béton constitutif $< 1700 \text{ kg/m}^3$)
- Béton cellulaire auto-clavé ($400 \text{ kg/m}^3 < \text{masse volumique réelle} < 800 \text{ kg/m}^3$). Ce matériau est composé de chaux, ciment, sable et de poudre d'aluminium, qui au contact de la chaux, produit des petites bulles d'hydrogène. C'est le bloc de construction maçonnée qui offre la meilleure résistance thermique.

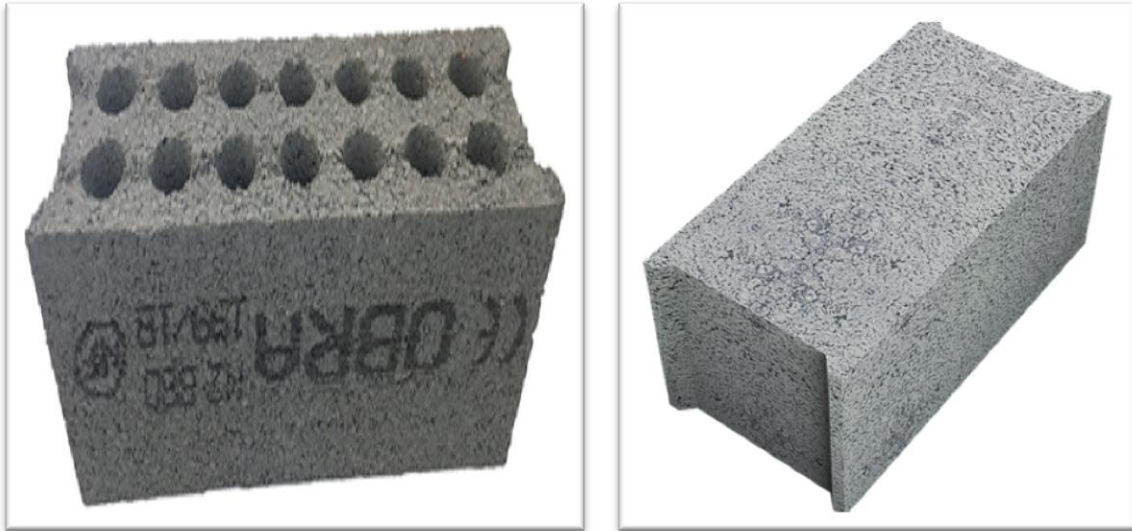


Figure I-1: Blocs à granulats [3]

*Selon la structure interne:

- Blocs pleins (**Figure I-2**);



Figure I-2: Bloc pleine [3]

- Blocs perforés comportant des petits alvéoles cylindriques (**Figure I-3**);



Figure I-3: Bloc perforée [3]

- Blocs creux (**Figure I-4**) comportant des alvéoles débouchant ou non.



Figure I-4: Bloc creux [3]

*Selon la partie de l'ouvrage à traiter:

-Blocs courants pour les parties courantes;

-Blocs spéciaux (blocs linteaux, blocs de coupe, blocs tableau, blocs de chaînage, blocs poteaux, blocs d'angle) pour les parties d'ouvrage correspondantes (**Figure I-5**).

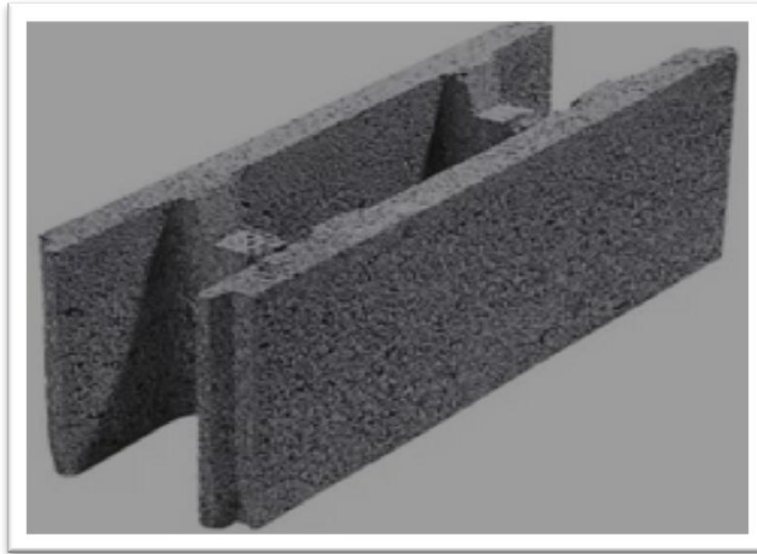


Figure I-5: Bloc spécial [3]

I.2.5. Maçonnerie en briques d'argile cuite

L'argile de terre cuite constitue un matériau léger qui convient parfaitement à la réalisation des murs de façade et des cloisonnements intérieurs.

a. Briques pleines

La brique pleine (**Figure I-6**) ordinaire est spécialement fabriquée pour l'exécution d'élément vus (façades), elle présente une gamme de teintes très variée. Elles sont montées à mortier de joints épais, généralement 1,5 cm pour les joints horizontaux et 1 cm pour les verticaux.



Figure I-6: Brique pleine [3]

b. Briques perforées et blocs perforés

La maçonnerie de briques perforées (**Figure I-7**) offre une excellente résistance à la compression (les perforations sont disposées verticalement à l'intérieur du mur) et présente une isolation légèrement supérieure à la brique pleine. Certaines de ces briques sont traitées sur une face afin d'offrir une surface esthétique et résistante, et d'autres reçoivent un enduit. Dans le but d'augmenter la résistance à la compression et pour faciliter la mise en œuvre, ils existent les blocs perforés qui permettent de réaliser toute l'épaisseur du mur par un seul élément.

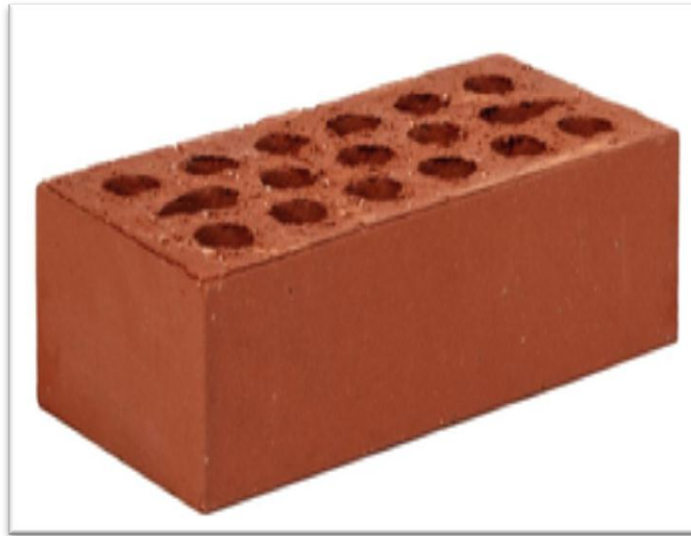


Figure I-7: Brique perforée [3]

c. Briques creuses

Les briques creuses (**Figure I-8**), beaucoup plus légères, et de plus grandes dimensions, permettent la réalisation de murs spécialement isolants. Ces produits ouverts aux deux extrémités, comportent des cloisonnements.

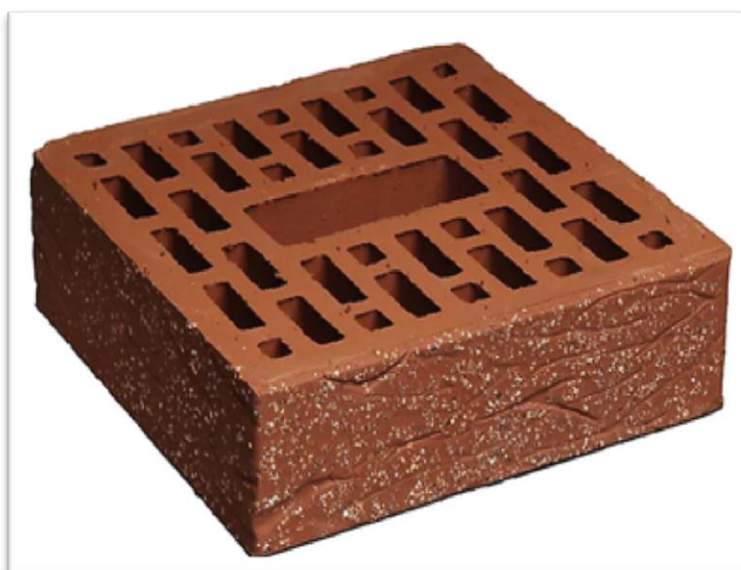


Figure I-8: Blocs perforés à enduire intérieurs longitudinaux continus sur toute la longueur.
[3]

En revanche, leur résistance à la compression est très faible. Cette maçonnerie reçoit généralement un enduit ou crépissage et trouve son utilisation principalement dans les maisons individuelles ou en remplissage pour les réparations intérieures de bâtiments. On distingue deux désignations de brique creuse:

- Briques à faces de pose continues, montées à joints de mortier horizontaux continus,
- Briques à rupture de joint, afin d'améliorer le comportement thermique du mur.

I.2.6. La maçonnerie et les principaux matériaux utilisés

La maçonnerie se définit comme l'art de bâtir une construction en assemblant différents matériaux, liés ou non par un mortier. On inclue également dans les travaux de maçonnerie l'habillage des ensembles participant à la tenue du bâti face aux agressions externes, comme par exemple la pose d'enduit. [3].

On distingue plusieurs grandes catégories de matériaux utilisés en maçonnerie: les éléments corps minéraux et végétaux (la pierre, la brique, le parpaing, la paille); les liants, servant à réaliser un mortier (l'argile, le ciment, la chaux, le plâtre); les mortiers, obtenus suite au mélange d'un liant et des granulats avec de l'eau (le mortier de chaux, le mortier de ciment); les bétons; les granulats (le sable, les graviers); les additifs ou adjuvants (les accélérateurs de prise, les hydrofuges, les plastifiants, les retardateurs de durcissement); les enduits (l'enduit de lissage, l'enduit de rebouchage).

Les matériaux de construction les plus indispensables en maçonnerie.

a. La pierre et la brique

La pierre est utilisée dans la construction des bâtiments depuis la nuit des temps. Extrêmement durable, elle apporte beaucoup de caractère à votre maison. Elle peut être brute ou taillée, et il en existe une multitude de variétés comme le granit, les pierres calcaires, les grès.

La brique est également un matériau populaire depuis longtemps. Elle est fabriquée à partir d'argile, avec ou sans additifs, que l'on moule et cuit au four. C'est donc un matériau naturel, mais aussi un bon isolant phonique et un régulateur thermique, qui conserve la chaleur en hiver et la fraîcheur en été. Les briques peuvent être pleines ou creuses, et existent en plusieurs tailles et formats. [3].

b. Le parpaing et le béton cellulaire

Le parpaing, communément appelé bloc béton, est un matériau en forme de parallélépipède, composé de ciment, de gravier, de sable et d'eau. Naturel et recyclable, il est aussi bon marché. Son autre avantage est sa grande longévité, car il est incombustible, résistant à l'usure et aux intempéries. En revanche, on peut lui reprocher ses faibles performances en termes d'isolation thermique et acoustique. Les murs en parpaings demandent donc la pose d'un isolant par l'extérieur ou par l'intérieur.

Le béton cellulaire, en revanche, offre une très bonne isolation en raison de sa composition bien différente de celle des parpaings. En effet, ce matériau très répandu en Europe du Nord,

est un mélange de chaux, de sable, de ciment, d'eau et d'une poudre d'aluminium qui lui permet de capturer de petites bulles d'air. Cet air inerte occupe 80% du volume du bloc de béton et joue le rôle d'isolant. [3].

c. Le ciment, le béton et le mortier

Pour un non-professionnel, difficile parfois de distinguer ces matériaux et pourtant c'est assez simple. Le ciment est un ingrédient, il n'est jamais utilisé seul, mais toujours dans des recettes dans lesquelles on trouve d'autres composants. On l'utilise notamment pour fabriquer du mortier et du béton. Il existe des ciments naturels et des ciments artificiels.

Le béton est un mélange de ciment, de sable, de granulats et d'eau. On l'utilise pour réaliser le gros œuvre, par exemple, pour couler une dalle. Il existe du béton prêt à l'emploi, mais le maçon peut aussi en faire lui-même avec les ingrédients de base, dont le ciment.

Pour obtenir un mortier, on mélange du ciment, du sable et de l'eau. D'autres ingrédients peuvent aussi faire partie de la recette, comme de la chaux, des résines synthétiques, des solutions hydrofuges, etc.

d. L'enduit de façade

L'enduit est un mortier qui assure la protection de la maçonnerie et joue un rôle décoratif. Certains types d'enduits permettent aussi de ragréer, reboucher et réparer la maçonnerie abîmée. Sur une maçonnerie neuve, on peut utiliser un enduit monocouche, hydrofuge et en même temps coloré. Dans le cas contraire, il vous faudra utiliser un gobetis d'accrochage et un corps d'enduit avant d'appliquer un enduit de parement.

Les matériaux de construction sont la base de votre maison: ils ne peuvent pas être changés au cours des travaux de rénovation, à moins de détruire pour reconstruire. En les choisissant, prenez en compte tous les critères nécessaires et n'oubliez pas que les matériaux bon marché peuvent réduire la durée de vie de l'ouvrage.

I.2.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons constitués une banque de données sur la maçonnerie, définition, constituant, différents types utilisés dans la maçonnerie en suite nous avons signalé l'utilisation du plâtre recyclé dans la production des maçonneries.

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 plâtre recyclé, le sable et l'eau de gâchage.

II.2. Caractérisation des matériaux

L'ensemble des matériaux utilisé dans ce travail:

- Un ciment blanc de type CEMI 52.5R provenant de la cimenterie LAFARGE.
- Un sable de carrière fourni par ENG – SAFIA Ben Azouz- Skikda
- Fillers du plâtre recyclé obtenue par broyage des déchets (chutes de plâtre) de plâtre.
- Eau de gâchage du robinet.

II.2.1. Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude pour l'ensemble des compositions, est un ciment portland de type CEM I de classe 52,5R de couleur blanche, conforme à la norme algérienne NA 442 (**Figure II-1**), provenant de la cimenterie LAFARGE (Algérie).

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



Figure II-1: Ciment portland CEM I 52.5 (Blanc)

- Propriétés physiques de ciment

- La densité est de 3.04 g/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 $3148\text{cm}^2/\text{g}$, 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:** se fait 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 52.5R			
Désignation	Résultats en %	Désignation	Résultats en %
CaO	67.28	CaO Libre	0
Al₂O₃	3.22	SO₃	2.15
Fe₂O₃	0.28	MS	6.73
SiO₂	23.54	PAF	4
MgO	2.45	C₃S	72.89
Na₂O	0.12	C₂S	12,90
K₂O	0.36	C₃A	8.06
Cl⁻	0.034	C₄AF	0.85

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

Tableau II-2: Propriétés physiques et mécaniques du CEM I 52.5R			
	2jours	7jours	28jours
Résistance en traction par flexion en MPa	5.10	6.21	7.60
Résistance en compression en MPa	28	45.26	56.70
La prise	Début de prise	Fin de prise	/
	132mm 22s	198mm 24s	/

- La substitution se fait par quartage (**Figure II-4**).



Figure II-4: Substitution

II.2.2. Fillers du plâtre recyclé

L'ajout utilisé dans notre programme de recherche les fillers du plâtre recyclé (**Figure II-5**), sont des chutes de plâtre récolté de plusieurs endroits.

Après leur broyage à la finesse désirée, cet ajout au ciment a une surface spécifique de $3130\text{cm}^2/\text{g}$ et une masse volumique absolue de $2.60\text{g}/\text{cm}^3$.



a- Avant broyage

b- Après broyage

Figure II-5: Echantillon des fillers de plâtre recyclé

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

Désignation	Résultats en %	Désignation	Résultats en %
CaO	34.48	MS	2.012
Al ₂ O ₃	0.64	K ₂ O	0.03
Fe ₂ O ₃	0.18	Cl	0.002
SiO ₂	1.65	SO ₃	40.15
MgO	2.29	PAF	11.00
Na ₂ O	0.001	CaSO ₄ ·2H ₂ O	86.32

Le plâtre est composé essentiellement de gypse (86.32%), et de l'ordre de 34.48% de CaO.

Le gypse joue le rôle d'un régulateur de prise qui retarde la formation d'aluminate de calcium hydraté en donnant d'abord du trisulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite).

Le gypse dépend largement de la teneur en aluminate tricalcique (C3A) dont la prise est extrêmement rapide.

La présence de SO₃ dans le gypse (40.15%) réduit le pourcentage de C3A et C3S ainsi que le rapport de C3S/C2S mais elle n'affecte pas le pourcentage de C4AF.

Le ciment, produit à partir d'un clinker contenant un taux relativement élevé de soufre, a une meilleure résistance aux sulfates et un développement relativement lent de la résistance à la compression qu'un ciment classique ayant la même composition chimique.

La présence des matières organiques (PAF= 11) dans le gypse augmente l'absorption d'eau.

II.2.3. Sable

a. Analyse granulométrique [NF EN 933-1] [1]

On peut définir l'analyse granulométrique par tamisage (norme **NF EN 933-1**), c'est un ensemble des opérations aboutissant à la séparation des grains selon leur grosseur des éléments constituant l'échantillon (**Figure II-6**), en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension. Les résultats de cet essai sont donnés par le **Tableau II-4**.



Figure II-6: Analyse granulométrique

Tableau II-4: Résultats d'analyse granulométrique du sable			
Tamis (mm)	Refus cumulés(g)	Refus cumulés(%)	Tamisât(%)
4.00	78.6	6.60	93
2.00	549.2	46.08	54
1.00	799.8	67.11	33
0.5	919.4	77.15	23
0.25	990.0	83.07	17
0.125	1042.9	87.51	12
0.063	1057.3	88.72	11
T _n	0.8	-	-
MF	3.68		

Les résultats de l'analyse granulométrique sont exploités par les courbes d'analyse granulométrique (**Figure II-7**).

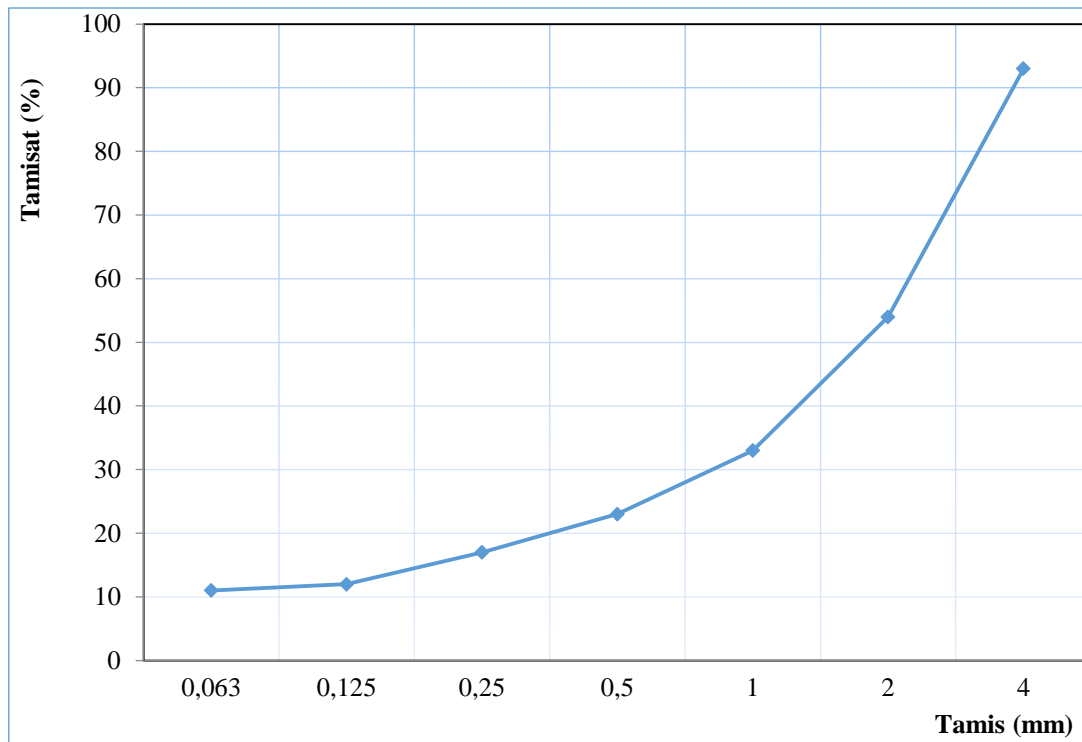


Figure II-7: Courbe d'analyse granulométrique des granulates

-Les résultats d'analyse granulométriques des granulates ordinaire est courant.

-La granulométrie de ce sable est continue. Le module de finesse est donnée par la formule suivante: $MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{4;1;0,5;0,25 ; 0,125\} = 3.68$ Il indique un sable un peu grossier qui donne une bonne résistance au détriment probable de l'ouvrabilité.

b. Masse volumique apparente [NF P18-555] [2]

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps c'est-à-dire celle du volume constitué par la nature du corps et les vides qu'elle contient. La masse volumique apparente est mesurée par un récipient d'un litre (**Figure II-8**). Les résultats de cet essai (norme **NF P18-555**) sont donnés par le **Tableau II-5**.

Désignations	Résultats
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1.680



Figure II-8: Essai de détermination de la masse volumique apparente.

c. Masse volumique absolue [NF EN 1097-6] [3]

La masse volumique absolue (NF EN 1097-6), c'est la masse de l'unité de volume absolue du corps sans tenir an compte du volume des vides. Les résultats de cet essai sont notés dans le **Tableau II-6**.

Désignations	Résultats
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.68

Les résultats obtenus indiquent que les granulats ordinaires présentent des densités apparentes et absolue courantes et peuvent être utilisé comme des constituants dans la formulation de ce mortier.

d. Essai au Bleu de Méthylène [NF EN 933-9] [4]

C'est l'absorption de bleu de méthylène par des éléments fin d'un sable, les fines sont caractérisés par la quantité de bleu de méthylène a absorbé par 200 g de fines. Cet essai (**Figure II-9**) est régi par la norme NF EN 933-9 et les résultats sont indiqués dans le **Tableau II-7**.

Echantillons	Résultats
Masse sèche de la prise d'essai (M1) g	200
Volume du bleu introduit (V1) cm	5
Valeur au bleu de méthylène %	0.25



Figure II-9: Essai au Bleu de Méthylène

D'après le résultat de cette essai $V_B = 0.25 \leq 1.5$ indique que le sable de carrière est un sable à faible pourcentage de fines argileux ce qui convient bien pour un bon Eco-matériau.

e. Equivalent de sable [NF EN 933-8] [5]

Le but de cet essai (**Figure II-10**) est évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des mortiers. L'essai est réalisé conformément à la prescription de la norme **NF EN 933-8** et les résultats obtenus sont notées au **Tableau II-8**.

Désignations	Nature	ES (%)	Moyenne
Sable de carrière	Echantillon [*] 1	60.19	60 %
	Echantillon [*] 2	59.81	



Figure II-10: Equivalent de sable

La propreté marquée par l'essai de l'équivalent de sable est 60%, indique que les granulats utilisés sont propres à faible pourcentage de fines argileuse, donc la qualité acceptable.

f. Absorption d'eau [NF EN 18-555] [6]

Le coefficient d'absorption est le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20° C. Les résultats de cet essai sont donnés par le **Tableau II-9**.

Tableau II-9: Absorption d'eau du sable	
Désignations	Résultats
Absorption d'eau (%)	0.68

Le coefficient d'absorption du sable de carrière est de 0.68 inférieur à 5%; donc l'utilisation de ce sable donne un Eco-matériau durable.

g. Analyse chimique [NFP 18 - 011] [7]

L'analyse chimique a été effectuée au laboratoire de la cimenterie de **Hdjar -soud**. Les résultats obtenus sont donnés dans le **tableau II-10**.

Tableau II-10: Analyse chimique des granulats	
Désignation	Résultats en (%)
CaO	55.2
Al₂O₃	0.12
Fe₂O₃	0.1
SiO₂	0.23
MgO	0.69
Na₂O	0.07
K₂O	0.07
SO₃	0.01

D'après le tableau en à, la teneur en CaO est de 55.2 %, donc le sable est de nature calcaire.

II.2.4. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est l'eau potable du réseau publique. L'analyse chimique est représentée dans le **TableauII-11**, dont les résultats répondent à toutes les prescriptions de la norme EN 1008.

Tableau II-11: Analyse chimique de l'eau						
Cl Mg/l	PH	T°	Salinité	TDS Mg/l	Conductivité Us/cm	Observation
0,1	7,3	28	0,2	297	541	Turbidité : 1,44ntu Eau de bonne qualité

II.3. Conclusion

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 plâtre recyclé;
- La surface spécifique du ciment est proche à celle du plâtre. Cette finesse impacte les principales propriétés physiques et mécaniques des matériaux;
- La présence du CaO dans le plâtre favorise la formation du C3S et augmente les résistances au jeune âge;
- La présence du gypse dans le plâtre recyclé contribue à la prise et au durcissement rapide.

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 expérimentale et méthodologie d'essais

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous exposons le programme expérimental utilisé dans l'étude de la substitution du ciment par le plâtre recyclé, les paramètres, la formulation, les essais et les méthodes de fabrication des mélanges.

III.2. Programme expérimental

L'objectif de cette partie de recherche est d'étudier l'effet du taux de substitution volumique d'une partie de ciment blanc par le plâtre recyclé en faisant varier les taux de substitution (6%, 12% et 18%) sur les caractéristiques d'un Eco-matériau destiné à la confection de block de maçonnerie à l'état frais et durci ensuite comparé les résultats obtenus par des échantillons de références de 0% de taux de substitution.

Les paramètres fixes sont:

- Dosage en sable
- Dosage en eau

Les paramètres variables sont:

- Les taux de substitution du ciment par les fillers de plâtre recyclé

La réalisation de ce programme expérimental a conduit à la confection d'une formulation d'un Eco matériau (**Tableau III-1**), la quantité d'eau est fixée par des essais préliminaires de consistance.

Tableau III-1: Différentes formulations	
Notation	Type de Block de maçonnerie
B (0%)	Block de maçonnerie à base de ciment blanc et sable ordinaire
B (6%)	Block de maçonnerie à base de 94% de ciment blanc et 6% de fillers de plâtre recyclé sable ordinaire
B(12%)	Block de maçonnerie à base de 88% de ciment blanc et 12% de fillers de plâtre recyclé sable ordinaire
B(18%)	Block de maçonnerie à base de 82% de ciment blanc et 18% de fillers de plâtre recyclé sable ordinaire

Les paramètres et les essais effectués sont présentés dans le (**Tableau III-2**).

Tableau III-2: Les paramètres et les essais effectués	
Désignations	Paramètres et essais
Paramètres constants	-Dosage en sable -Dosage en eau
Paramètres variables	Taux de substitution du ciment par le plâtre recyclés
Essais effectués	-Consistance -Densité -Résistance en traction par flexion à 3, et 28 jours. -Résistance en compression à 3 et 28 jours. -Résistance en traction par flexion à 28 jours sur éprouvette traité thermiquement à 50°C, 100°C. -Résistance en compression à 28 jours sur éprouvette traité thermiquement à 50°C, 100°C. -Scléromètre et ultrason. -Absorption d'eau par immersion. -Absorption d'eau par capillarité -Porosité accessible à l'eau. -Attaque chimique par l'eau de KOH et NaCl dans 3, 7, 14, 21, 28, 56 et 90 jours.

III.3. Formulation des mélanges

Les formulations sont présentées dans le **Tableau III-3**.

Tableau III-4: Composition des mélanges				
Notation	Ciment (kg)	Fillers recyclés (kg)	Sable (kg)	Eau (kg)
M(0%)	250	0	1000	142.85
M(6%)	239.84	10.16	1000	142.85
M(12%)	229.76	20.24	1000	142.85
M(18%)	219.51	30.49	1000	142.85

III.4. Fabrication des mélanges

a. Malaxage

Le malaxage se fait dans une bétonnière normalisée (**Figure III-1**), conformément à la norme **EN 196-1**, le volume de la cuve est de 132L et le volume de malaxage est de 100L. Le temps de malaxage suivant la norme NF P 18-404 est de 60 secondes pour le malaxage à sec et 120 secondes pour malaxage humide.



Figure III-1: Malaxage

*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 (40 x 40 x 160) mm, pour l'essai de compression et traction par flexion ainsi que l'essai d'absorption par capillarité (**Figure III-2**).

+Moule prismatique à plots: Moule triple pour prismes de mortier (40 x 40 x 160) mm, équipé de plot pour l'essai de retrait, gonflement, perte et gain en poids.

+Moules cubique de 10x10x10 cm³ pour l'essai de l'abrasion.



Figure III-2: Moule triple pour prismes 4x4x16 cm³

*Remplissage et vibration

Avant le remplissage des moules (**Figure III-3**), 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.

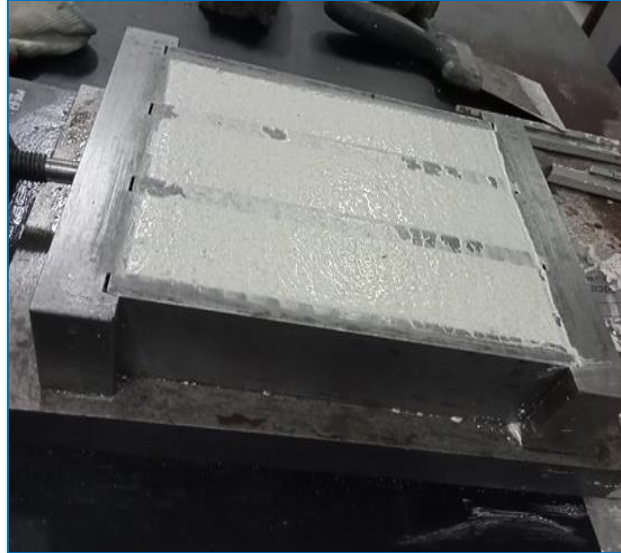


Figure III-3: Moule après remplissage

*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, (**FigureIII-4**) 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 ensuite dans l'eau l'étuve à 105°C (**FigureIII-5**) pendant 24h, ensuite elles sont immergées totalement dans l'eau à 20°C pendant une durée de 24h.
- Les éprouvettes destinées à l'essai d'absorption capillaire, sont conservées 28 jours ensuite dans l'étuve à 105°C pendant 72h.

- Après 28 jours d'immersion dans l'eau, les éprouvettes destinées à l'attaque chimique sont conservées dans une solution 4% CH_3COOH , KOH et NaCl)
- Les éprouvettes destinés a l'abrasion sont conservés 28jours dans l'eau.

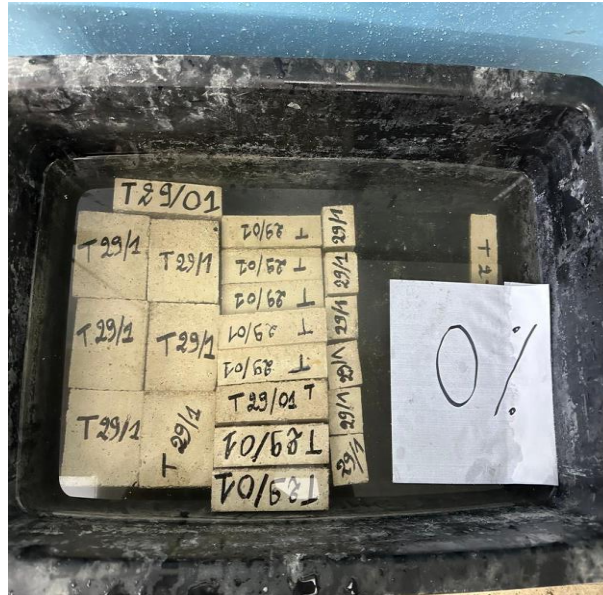


Figure III-4: Conservation des éprouvettes



Figure III-5: Etuve du laboratoire

III.5. Méthodes d'essais

III.5.1. Essais à l'état frais

a. Essais d'affaissement [NF P18-451]

L'essai d'Affaissement au cône d'Abrams (**figure III-6**) est l'essai le plus employé pour la mesure de la consistance. Cet essai a été effectué conformément aux prescriptions de la norme

NF P18-451. Le moule tronconique étant légèrement huilé est fixé sur la plaque d'appui, on le remplit en trois couches d'égales hauteurs, mises en place par piquage à raison de 25 coups par couche à l'aide de la tige de piquage. Après avoir arasé le bord supérieur, le moule est soulevé avec précaution. La mesure, exprimée en cm, est réalisée sur le point le plus haut du béton et dans la minute qui suit le démoulage.



Figure III-6: Mesure d'affaissement

C. Mesure de la densité

La masse volumique réelle du matériaux frais doit être systématiquement mesurée par la pesée d'un moule vide et une balance de précision de 0.01g selon la (Figure III-7).



Figure III-7: Mesuré la densité

Si (M) la masse du moule plein (avec mortier) et Mo celle du moule vide, la densité est déduite par application de la formule suivante:

$$M_v = (M - M_o) / V$$

M : la masse du moule plein en g

M_o : moule vide en g

V : volume du moule en cm³

III.5.2. Essais a l'état durci

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

Le dispositif utilisé est un dispositif de flexion 3 points (**Figure III-8**), comportant deux appuis à section semi-cylindrique de 10mm de diamètre, distant de 100 ou 106.7 mm (**Figure III-9**), 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-10**). 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-8: Presse hydraulique de flexion



Figure III-9: Dispositif d'essai de traction par flexion trois points

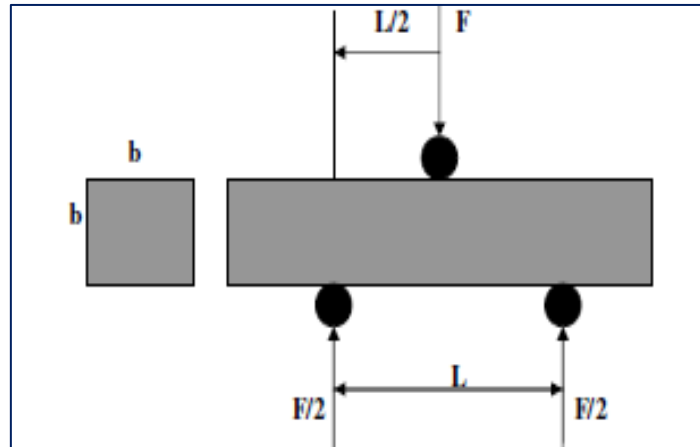


Figure III-10: Schéma mécanique de l'essai de traction par flexion trois points

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: 3j, 7j, 28j et 90j, après une cure dans l'eau correspondante à l'âge des éprouvettes à tester.

b. 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-11**). Chaque demi-échantillon est soumis au test de compression sur ces faces latérales de moulage, sous une section de 4x4 cm, entre deux plaques de métal dur d'au moins de 10mm d'épaisseur, de 40mm ± 0.1mm de largeur, ces plaques sont en carbure de tungstène, la demi-échantillon est placée entre elles de manière que son extrémité intacte dépasse d'au moins 1cm et que les arrêtes longitudinaux d'éprouvettes soient perpendiculaires à celle des plaques (**Figure III-12**).

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-11: Presse hydraulique de compression



Figure III-12: Dispositif d'essai de compression

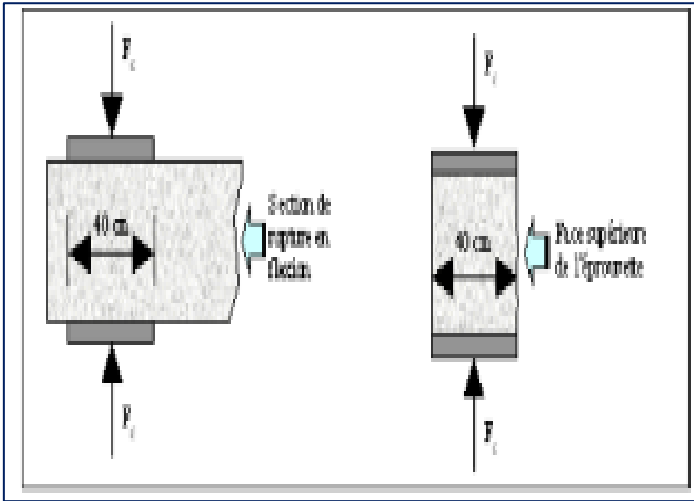


Figure III-13: Essai de compression sur éprouvette 4x4x16 cm

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: 3j, 7j, 28j et 90j, après une cure dans l'eau correspondante à l'âge des éprouvettes à tester.

c. 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: Deformetre



Figure III-15: Mesure du retrait

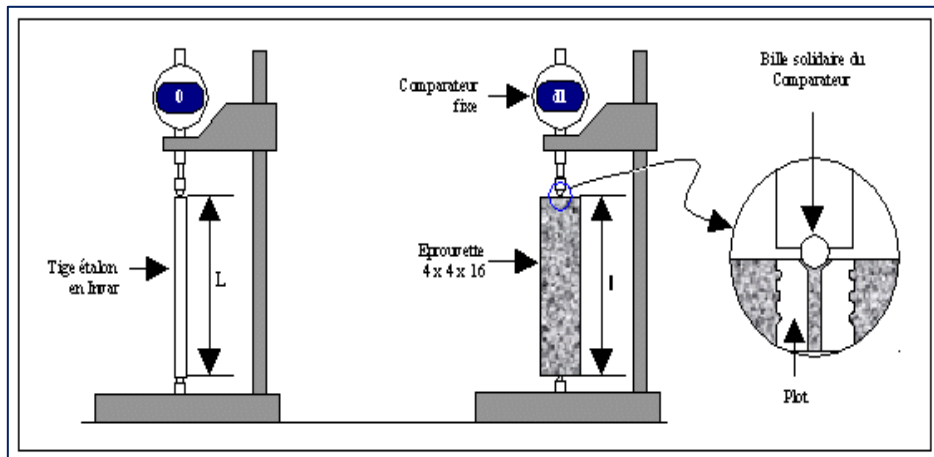


Figure III-16: Méthode de mesure de retrait et de gonflement

d. 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

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

L'absorption d'eau par immersion consiste à mettre les éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm³ du matériau 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 (**FigureIII-18**).



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

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 :

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

Avec :

m_h : Masse de l'éprouvette humide

m_s : Masse de l'éprouvette sèche

A_b : coefficient d'absorption d'eau par immersion

f. 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} .



Figure III-19: Essai d'absorption capillaire

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.

g. 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, Nf p 18-459).

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 porosité

h. Essai d'attaque chimique par les acides et les alcalins (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 et 4% NaCL

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 mn ,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.

En mesurant la variation de masse. 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

Le pourcentage de perte de résistance $\Delta\sigma$ a été déterminé par l'équation:

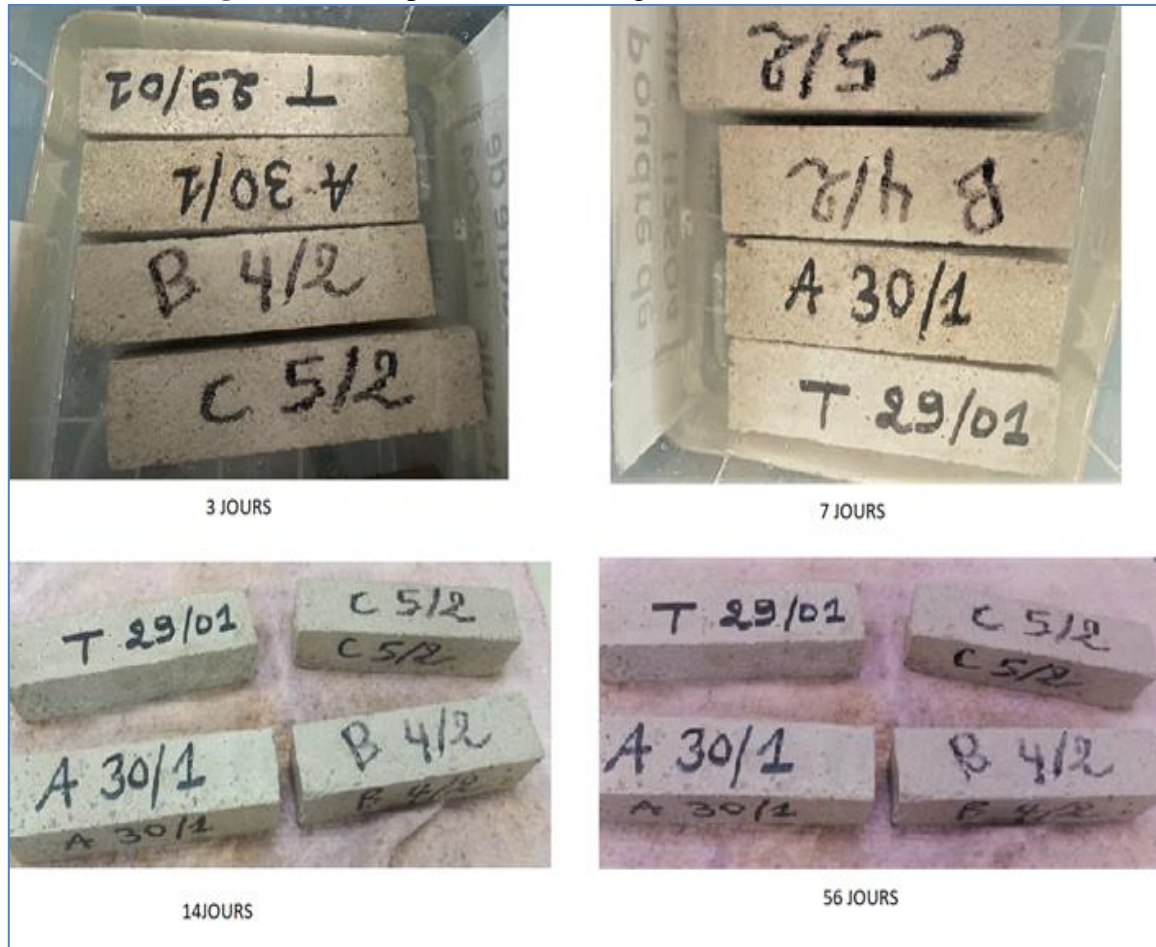
$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{Envi.} - \sigma_{S.E.}}{\sigma_{Envi.}} \times 100$$

$\sigma_{Envi.}$: résistance moyenne à la compression des éprouvettes conservés dans l'eau

$\sigma_{S.E.}$: résistance moyenne à la compression des éprouvettes immergés dans les solutions.

Les **Figure III-21 et II-22** montrent l'évolution des états des éprouvettes conservées dans les différentes solutions.



Figure III-21: Eprouvettes immergées dans la solution KOH%**Figure III-22:** Eprouvettes 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, les paramètres de composition ainsi que le mode de fabrication et de conservation des échantillons.
- L'ensemble des essais réalisés sur les différents matériaux ainsi que les méthodes d'essais qui se résument à:
 - Essai de consistance,
 - Essai de densité,
 - Essai de rupture par traction par flexion,
 - Essai de rupture par compression,
 - Essai de retrait,
 - Essai gonflement
 - Traitement thermique
 - Essai scléromètre et ultrason
 - 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 alcanes
- Essai d'abrasion.

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

Chapitre IV
Effet des fillers recyclés sur propriétés
du matériau composite

IV. Effet des fillers recyclés sur propriétés du matériau composite

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre on présente les résultats des essais sur l'ensemble des formulations et nous analysons les différents paramètres à savoir l'ouvrabilité et la densité à l'état frais les propriétés mécanique à l'état durci ainsi que les paramètres de durabilité.

IV.2. Effet des fillers recyclés sur les propriétés a l'état frais

IV.2.1. Densité

Dans la **Figure IV-1** on donne la variation de la densité en fonction du taux de substitution.

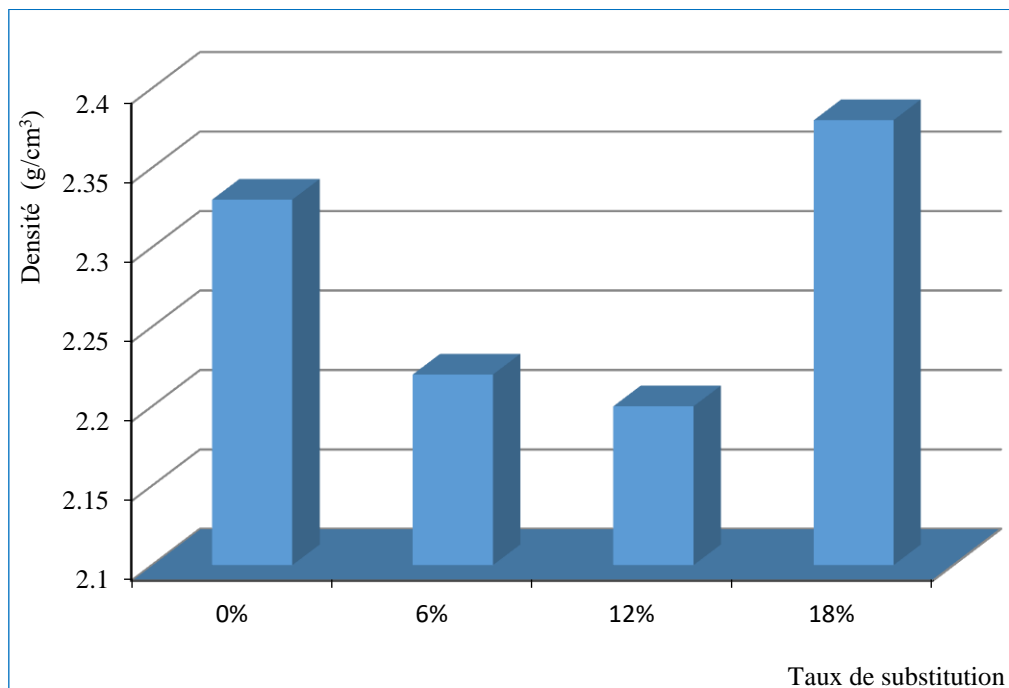


Figure IV-1: Variation de la densité en fonction du taux de substitution

On constate:

- Diminution de la densité dans les éprouvettes de 6% et 12% taux de substitution par rapport aux témoins
- Par contre on a constaté une forte augmentation de densité dans les éprouvettes de 18% taux de substitution

IV.2.2. Ouvrabilité

La **Figure IV-2** indique la variation de l'ouvrabilité en fonction du taux de substitution. L'ouvrabilité diminue en fonction de l'augmentation du taux de substitution, la meilleure ouvrabilité est donné par le témoin tandis que la mauvaise ouvrabilité est donnée pour un taux de 18%. Cette diminution dans l'ouvrabilité est dû essentiellement a la présence du gypse dans le plâtre recyclés

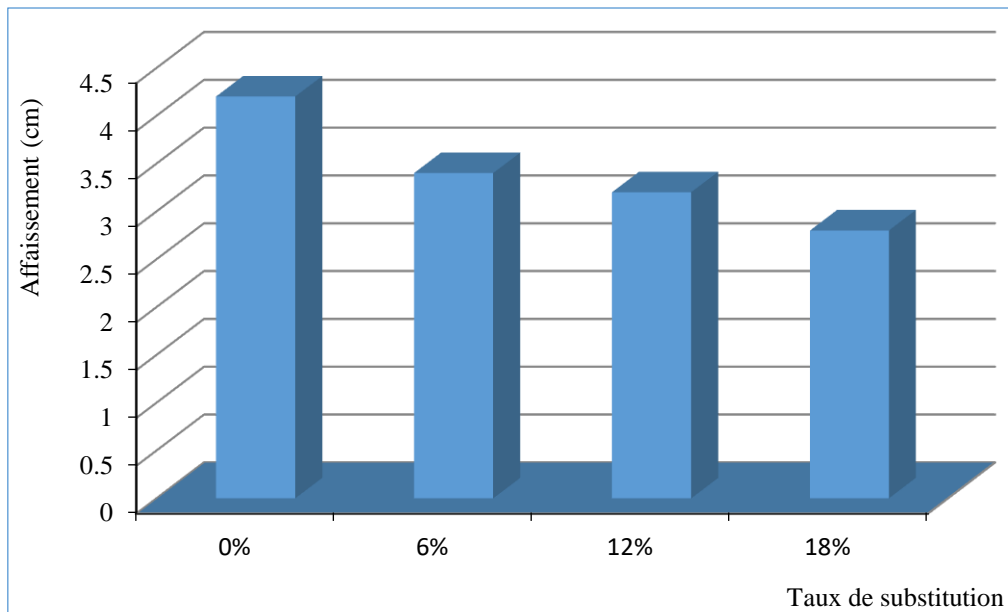


Figure IV-2: Variation de l'ouvrabilité en fonction du taux de substitution

IV.3. Effet des fillers recyclé sur les propriétés a l'état durci

IV.3.2. Densité à l'état durci

Sur la **Figure IV-3** on présente la variation de la densité à l'état durci.

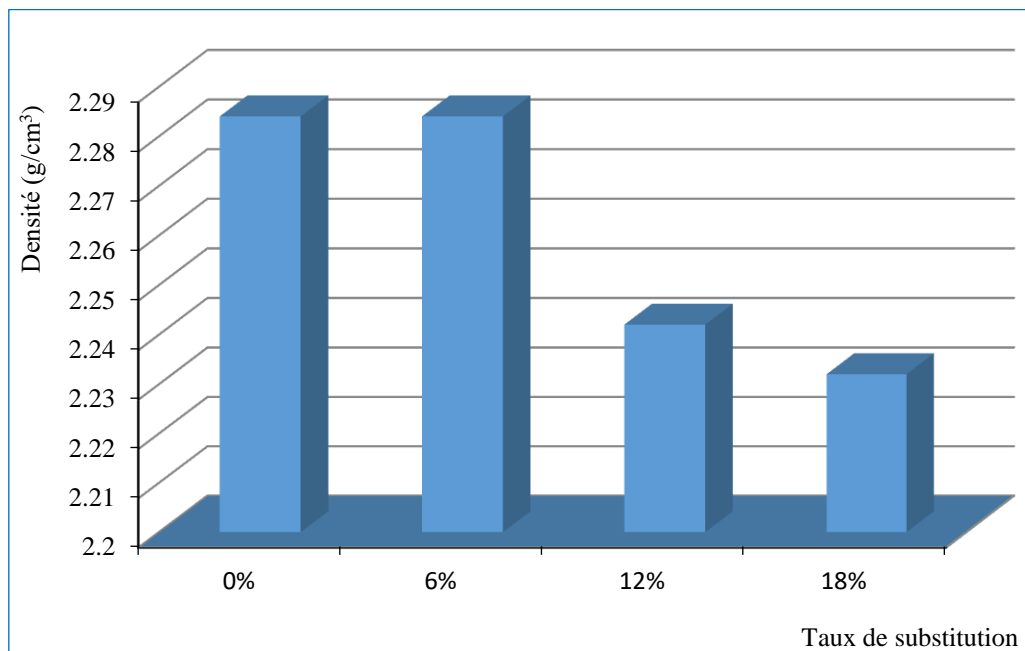


Figure IV-3: Variation de la densité en fonction du taux de substitution

Le remplacement partiel du ciment par l'ajout de plâtre recyclé engendre une diminution de la densité à l'état durci qui est expliquée par la densité du plâtre recyclé qui est inférieure à celle du ciment.

IV.3.3. Résistance à la compression

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

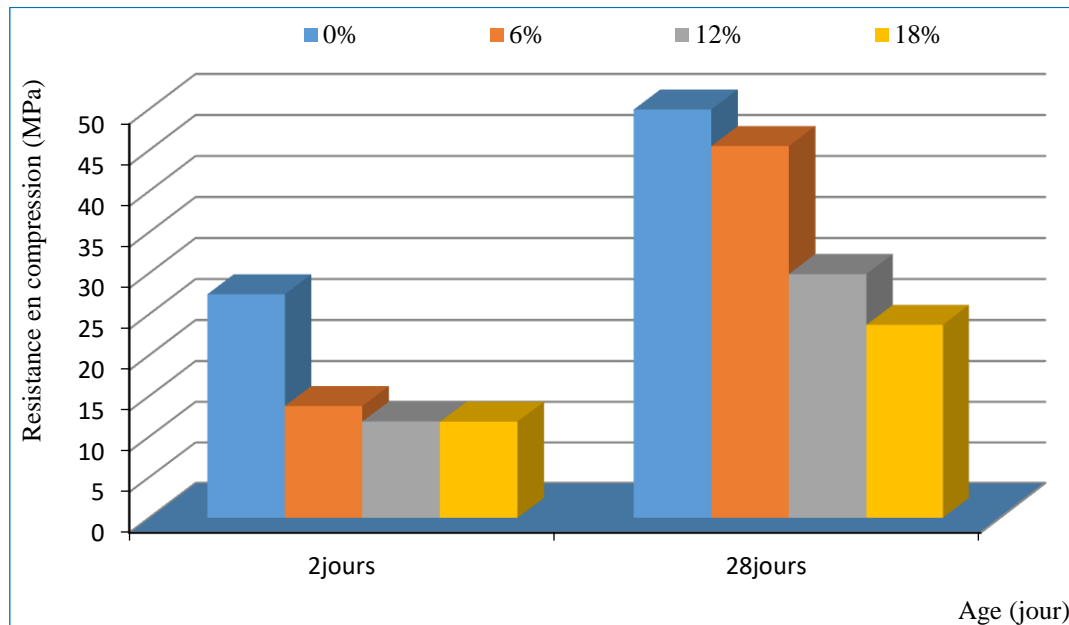


Figure IV-4: Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge et du taux de substitution

L'introduction des fillers recyclés engendre une diminution des résistances en compression à courte et moyen terme (2, 7 et 28 jours). La résistance augmente avec l'âge.

IV.3.4. Résistance à la traction par flexion

La **Figure IV-5**, indique la variation de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge et des taux de substitution.

La résistance en traction par flexion diminue en fonction de l'augmentation du taux de remplacement du ciment par les fillers de plâtre recyclé. La plus faible résistance est donnée par le matériau à base de 18% de taux de substitution. La résistance augmente avec l'âge.

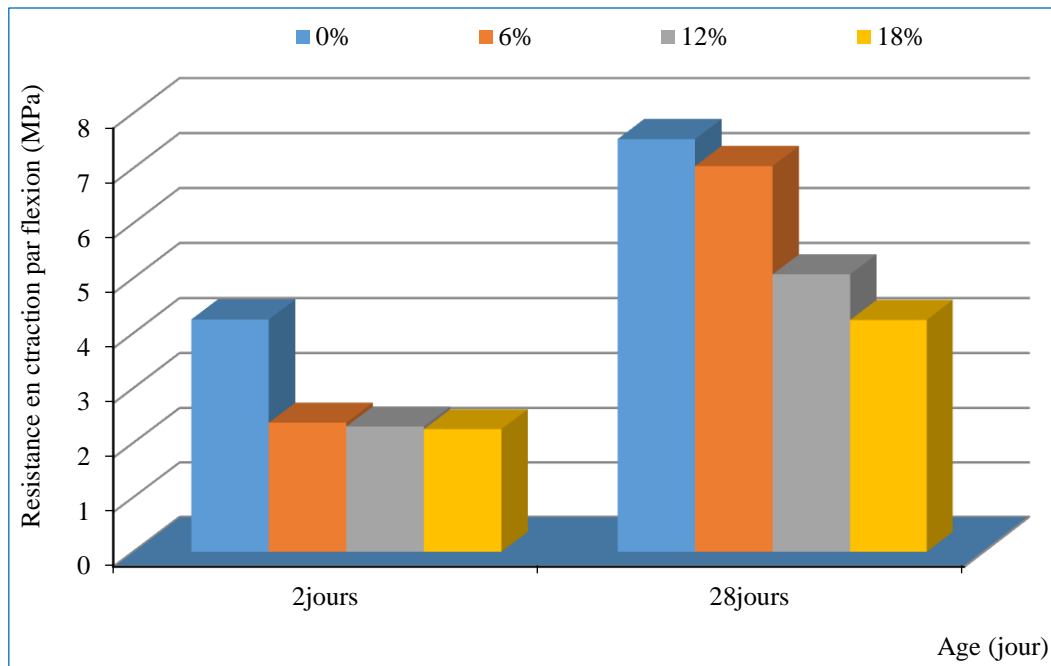


Figure IV-5: Variation de résistance à la traction par flexion en fonction De l'âge et du taux de substitution

IV.3.5. Résistance en compression obtenue par scléromètre

Sur la **Figure IV-6** on donne les résultats de l'essai scléromètre.

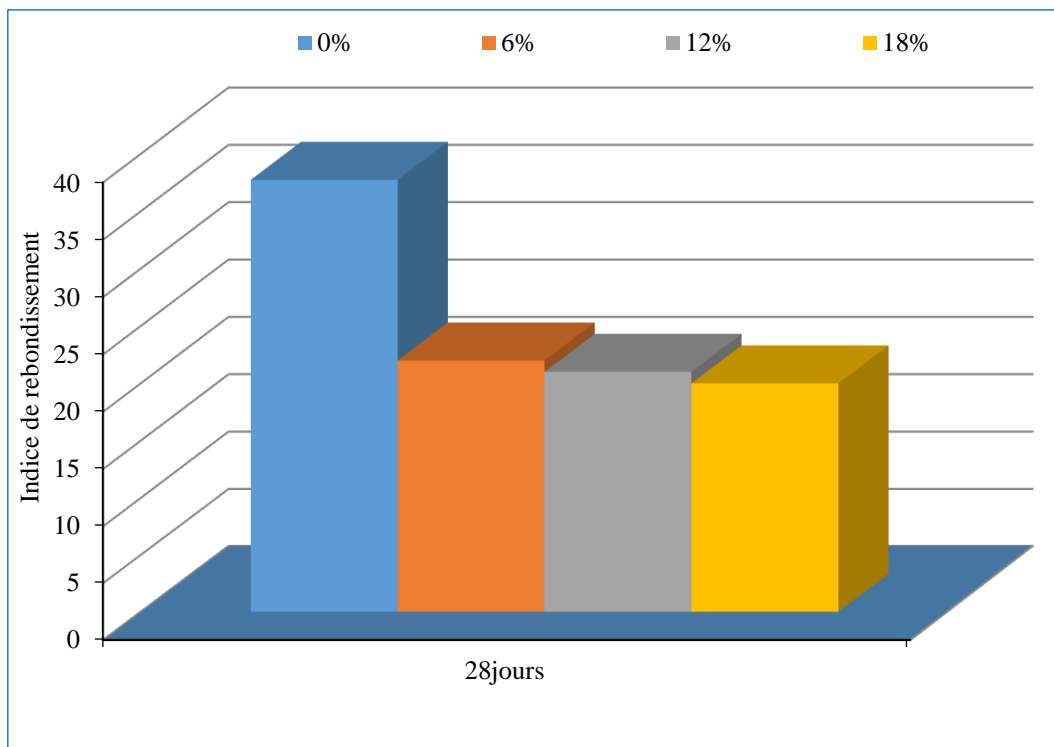


Figure IV-6: Variation de l'indice de rebondissement en fonction du taux de substitution

L'indice de rebondissement diminue à mesure que le taux de substitution augmente ceci est dû à la structure poreuse en fonction de l'augmentation du taux de substitution.

IV.3.6. Vitesse ultrasonique

Sur la **Figure IV-7** on présente la variation de la vitesse ultrasonique en fonction du taux de substitution.

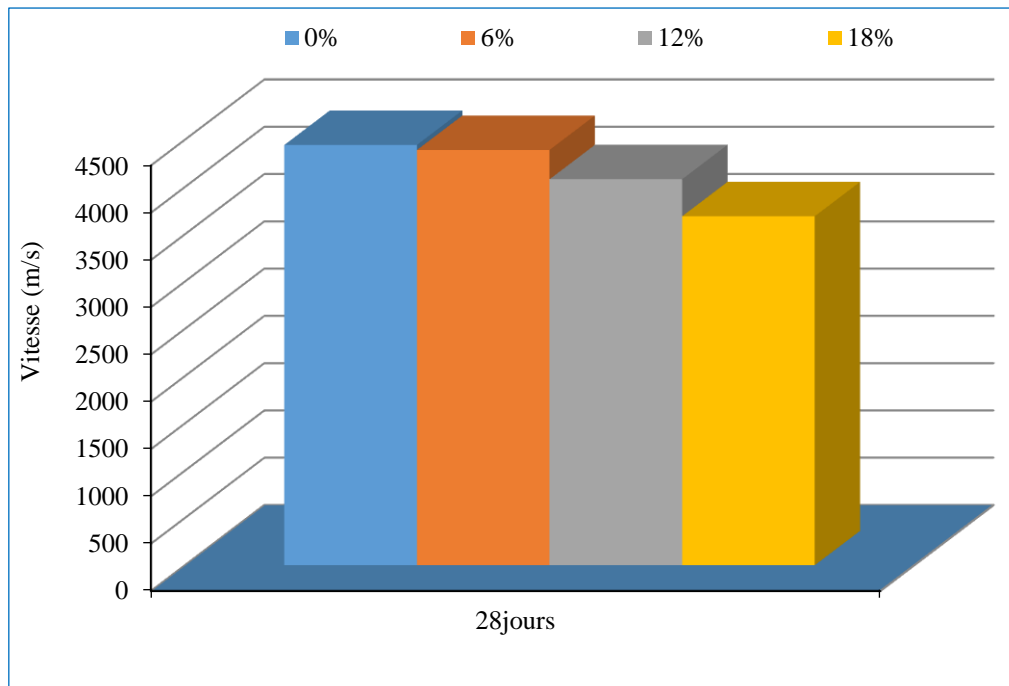


Figure IV-6: Variation de la vitesse des ultrasons en fonction du taux de substitution

La vitesse des ultrasons diminue à chaque augmentation de taux de substitution. La vitesse maximale est de 4444.44m/s donnée par le matériau témoin et 3690.03m/s pour un taux de 18%, ces résultats sont expliquées par la diminution de la densité a l'état durci en fonction du taux de remplacement.

IV.3.7. Influence de la température sur la résistance mécaniques et le poids des mortiers

a. Résistance en compression

Sur la **Figure IV-7**, on presente la variation de la resistance en compression des mortier en fonction de la temperature de traitement.

Le traitement thermique influe négativement sur la résistance du matériau témoin, on constate une chute de résistance par rapport à l'échantillon témoin non traité thermiquement et en fonction de l'augmentation de la température de traitement.

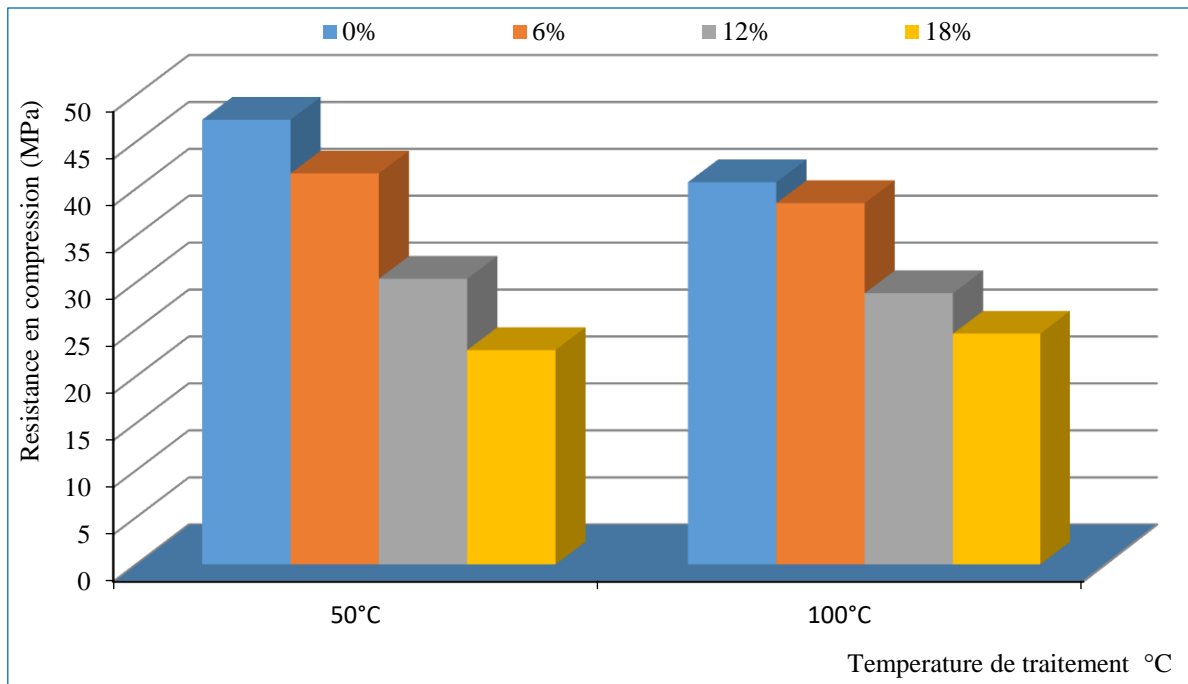


Figure IV-7: Résistance en compression a l'âge 28jours en fonction de la température de traitement.

b. Résistance en traction par flexion

Sur la **Figure IV-8**, on presente la variation de la resistance en traction par flexion des mortier en fonction de la temperature de traitement.

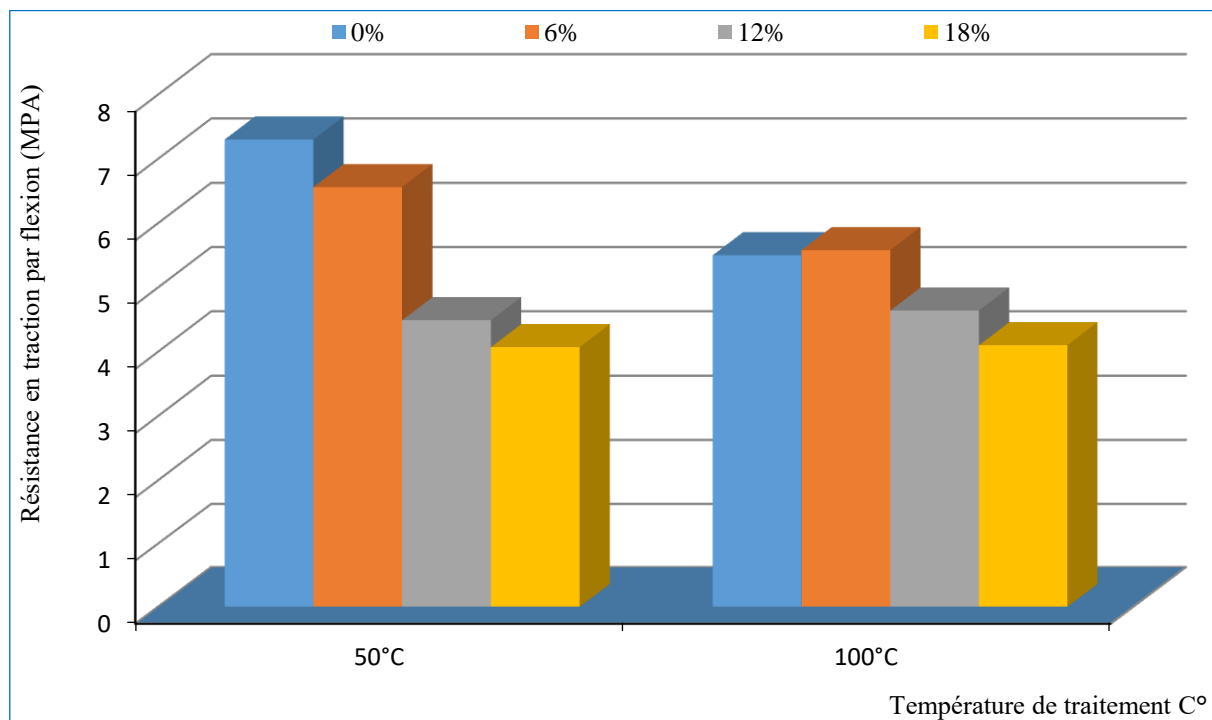


Figure IV-8: Résistance en traction par flexion a l'âge 28jours en fonction de la température de traitement

D'une manière générale la résistance en traction par flexion des échantillons traités thermiquement est plus faible en comparaison avec les échantillons non traité. La valeur maximale est donnée par le matériau témoin à 50°C tandis que la valeur minimale est enregistrée pour le taux de 18% a une température 100°C.

c. Perte en poids

Sur la **Figure IV-9**, on présente la variation des masses des mortier en fonction de la temperature de traitement.

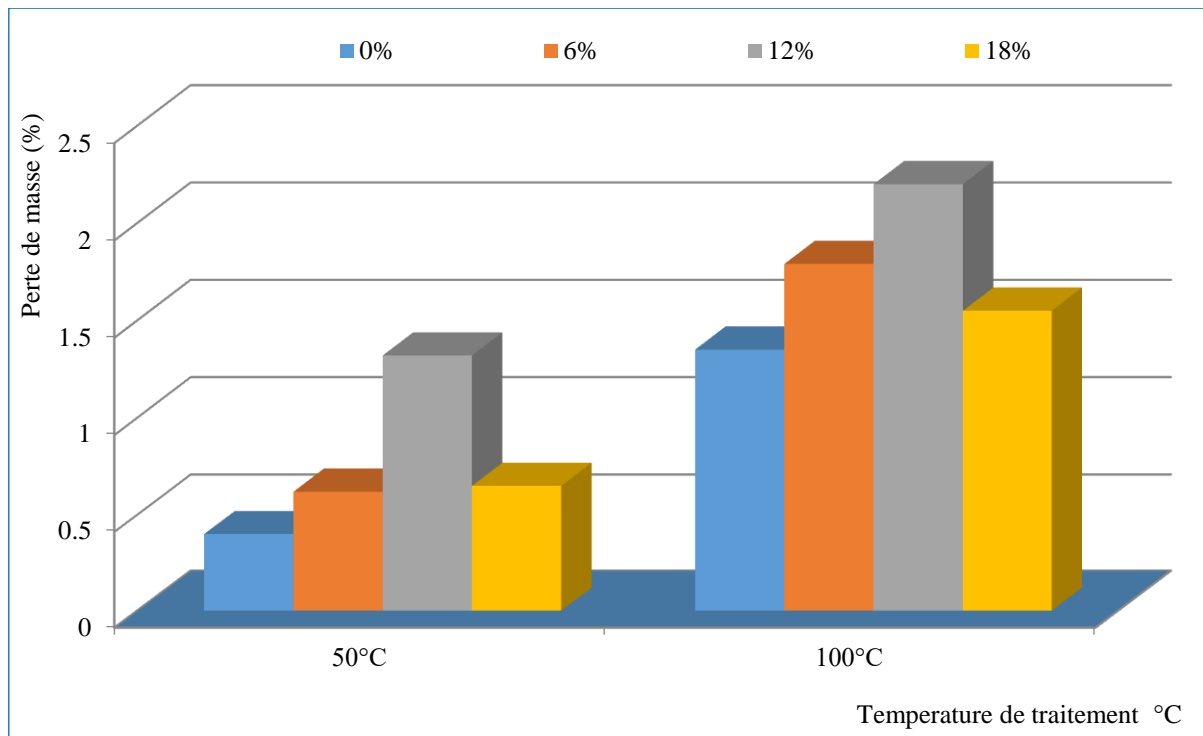


Figure IV-9: Perte en poids des éprouvettes traitées thermiquement

La perte en poids augmente en fonction de la température de traitement la perte maximale est de 10.41 enregistré pour un taux de 12%.

IV.3.8. Variation dimensionnelle (retrait et perte en poids)

IV.3.8.1. Retrait et perte en poids

Les résultats des retraits obtenus sont illustrés sur les **Figures IV-10**. Le matériau de référence présente une déformation de retrait minimale en comparaison avec les autres échantillons.

Le retrait des matériaux à base de plâtre recyclé diminue en fonction de l'augmentation du taux de substitution pour atteindre des valeurs minimales à 6%. Le retrait augmente avec l'âge

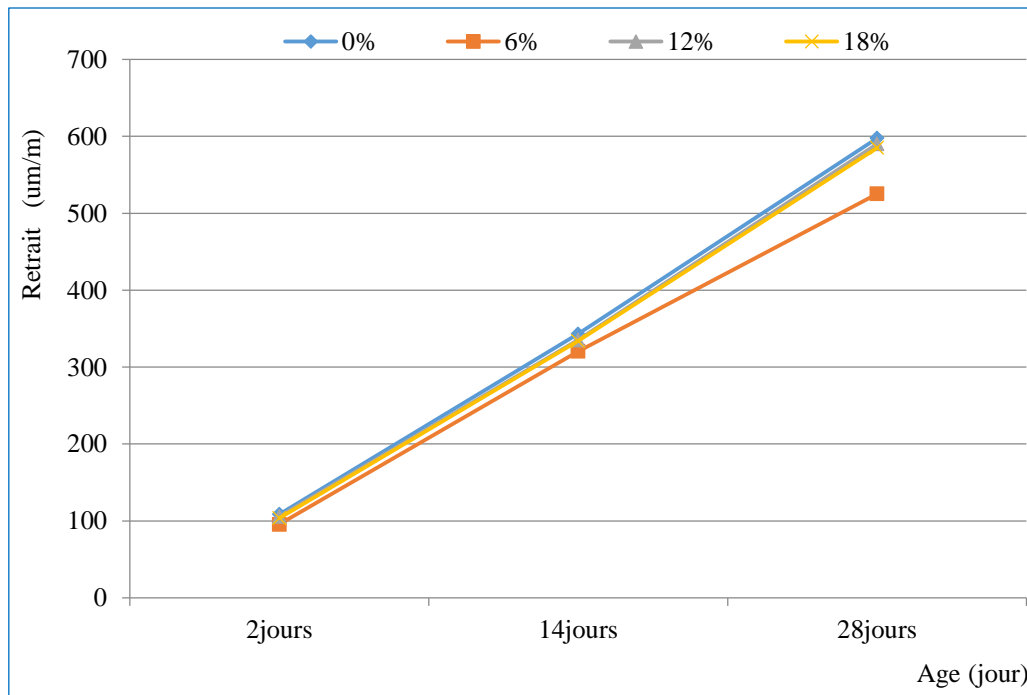


Figure IV-10: Variation du retrait total en fonction du temps

Les résultats de la perte en masse des essais de retrait sont donnés par la **Figure IV-11**.

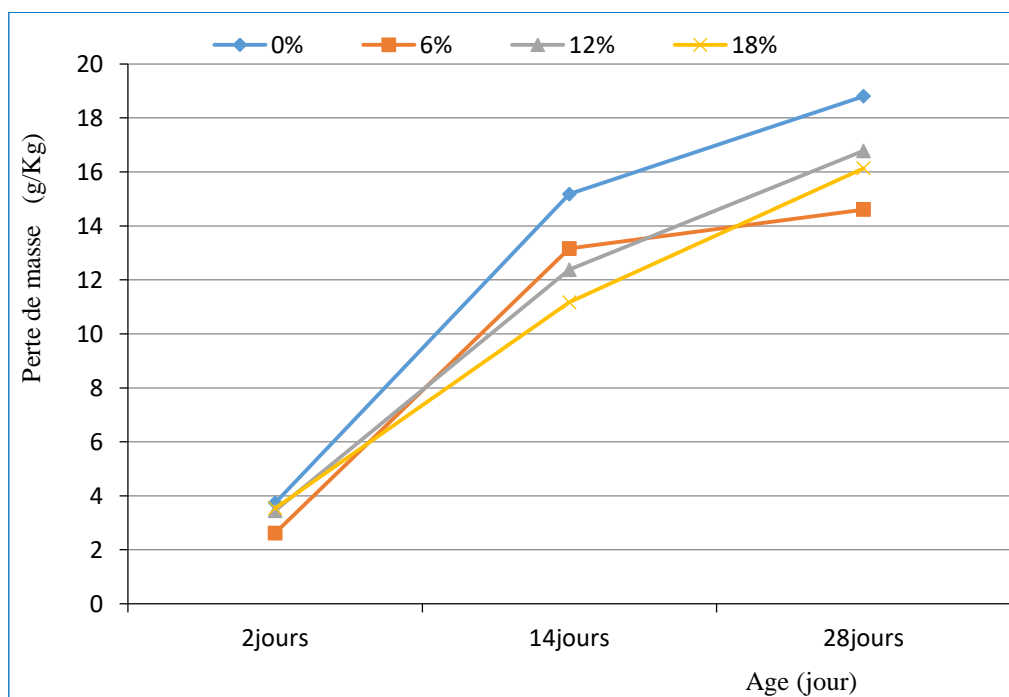


Figure IV-11: Variation de la perte en poids en fonction du temps

L'analyse des résultats de la perte en poids des échantillons de retrait montre que la perte maximale est donnée par le matériau témoin. Les matériaux à base de plâtre recyclé présentent les pertes les plus faibles

IV.3.8.2. Gonflement et gain en poids

Les résultats des gonflements obtenus sont représentés dans la **Figure IV-12**.

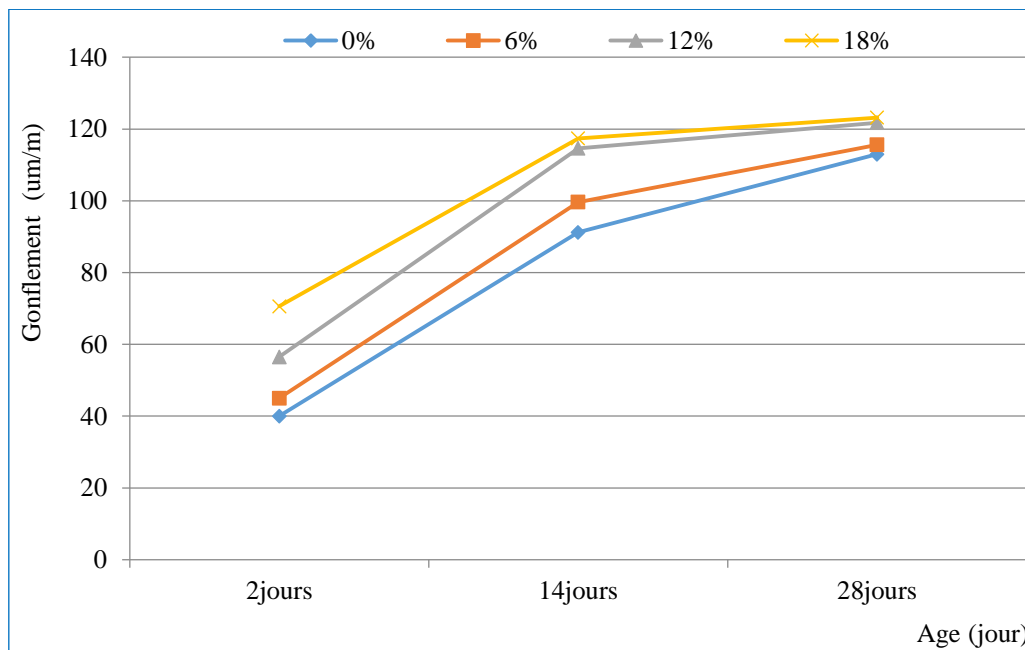


Figure IV-12: Variation du gonflement en fonction du temps

La **Figure IV-12** indique que le gonflement augmente avec l'augmentation du taux de plâtre recyclé et l'âge. Le gonflement minimal est donné par le matériau témoin.

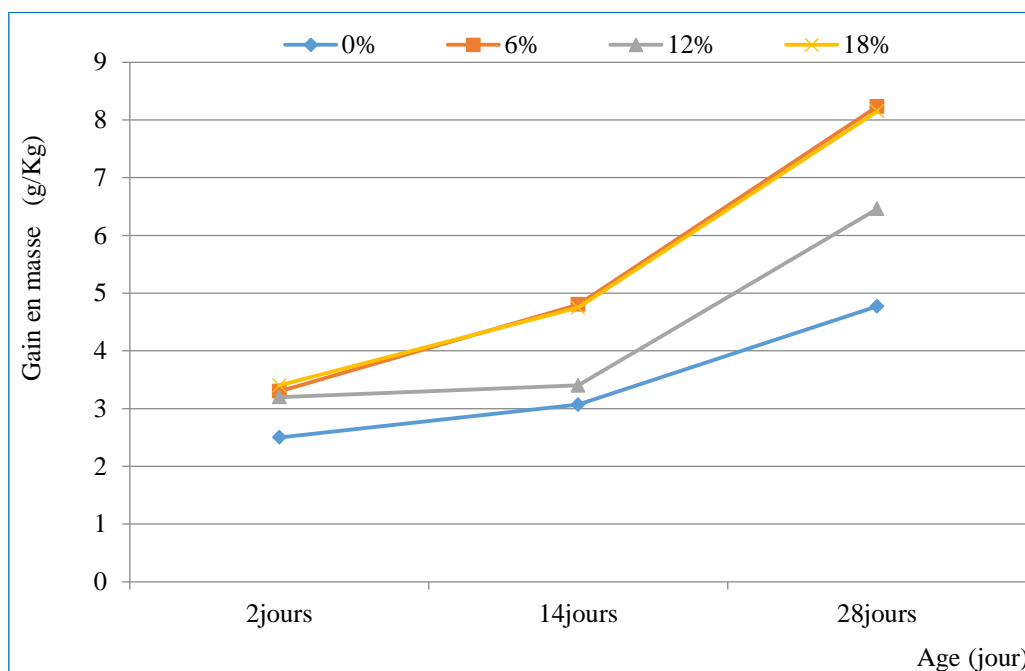


Figure IV-13: Variation du gain en poids en fonction du temps

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 du gonflement est obtenu pour le matériau témoin.

IV.3.9. Variation de l'absorption d'eau par immersion

Les valeurs du coefficient d'absorption par immersion sont illustrées dans la **Figure IV-14**.

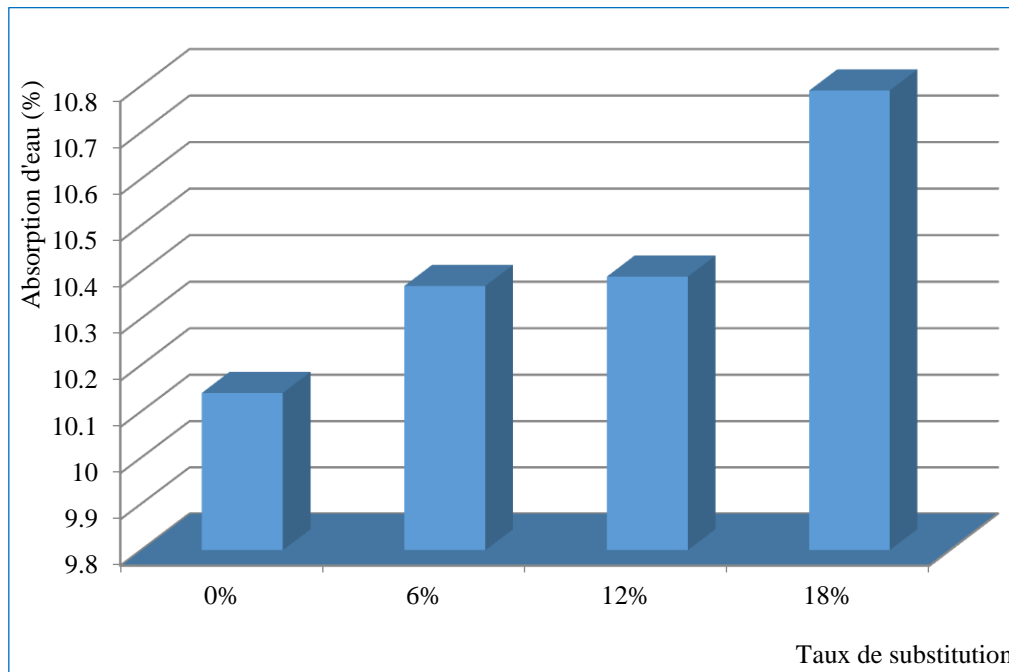


Figure IV-14: Variation du coefficient d'absorption d'eau par immersion en fonction du taux de substitution

L'analyse des résultats obtenus, montre que le coefficient d'absorption augmente au fur à mesure que le taux de substitution augmente. Ceci est dû à la présence des matières organiques ($paf=11$) et à l'absorption élevée du plâtre, la valeur maximale est trouvée à un taux de 18%.

IV.3.10. Variation de l'absorption par capillarité

La **Figure IV-15** montre la variation du coefficient d'absorption par capillarité en fonction du temps.

Les courbes présentent une variation très rapproché jusqu'à 30min sauf pour l'échantillon 12% de taux de substitution. Au-delà de 30min la variation est plus accentuée et l'ordre de classement des mélanges n'est pas respecté. L'absorption capillaire augmente avec l'âge de conservation dans l'eau.

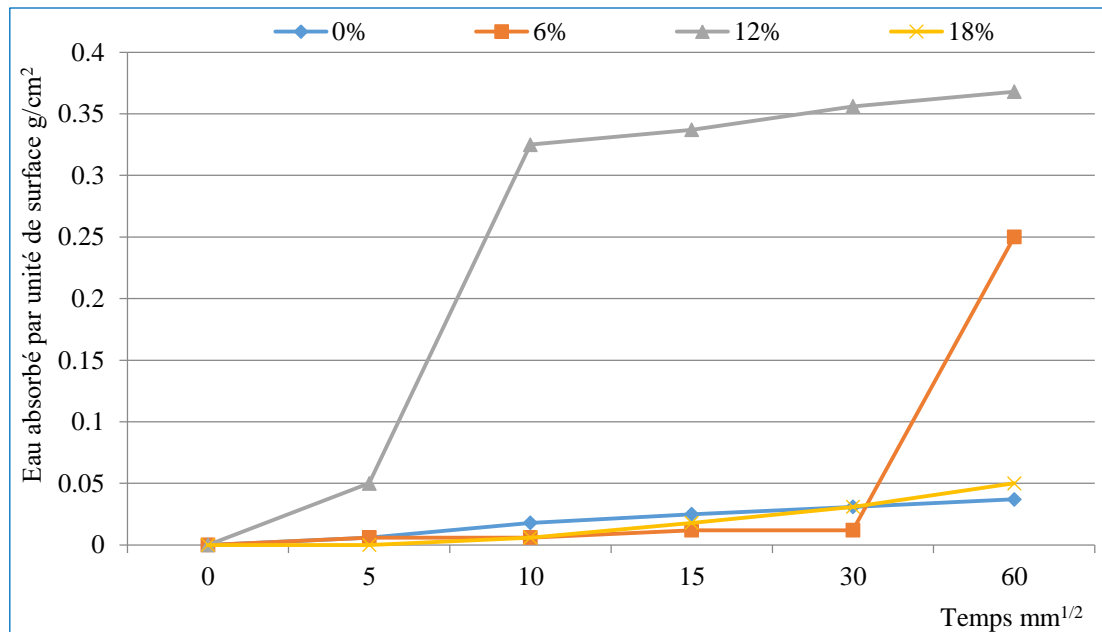


Figure IV-15: Variation de l'absorption par capillarité en fonction du temps

IV.3.11. Porosité accessible à l'eau

La Figure IV-16 donne la variation de la porosité accessible à l'eau en fonction du taux de fillers de plâtre recyclés.

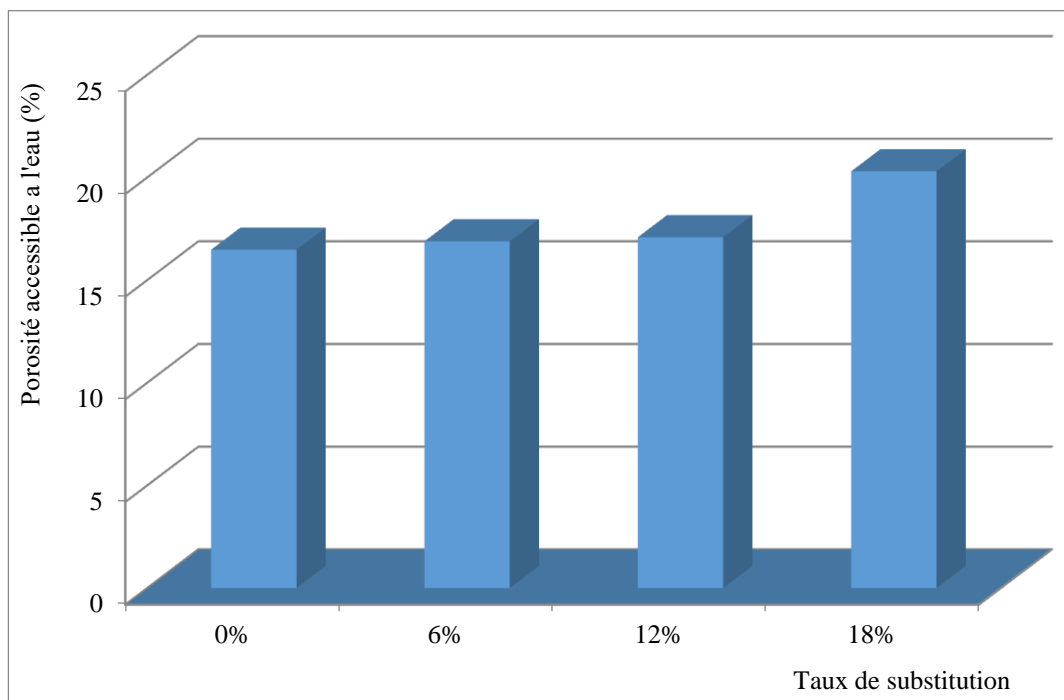


Figure IV-16: Variation de la porosité accessible à l'eau en fonction du taux de substitution

L'ajout de fillers de plâtre recyclés au béton augmente leur porosité accessible à l'eau qui est expliqué par l'absorption élevée du plâtre recyclé.

IV.3.12. Attaque des composites par les acides et les bases

a. Attaque des par KOH

Les résultats relatifs au suivi de la variation de la perte de masse en fonction de la durée d'immersion des éprouvettes dans la solution d'acide chlorhydrique de KOH de concentration, sont présentés dans la **Figure IV-17**.

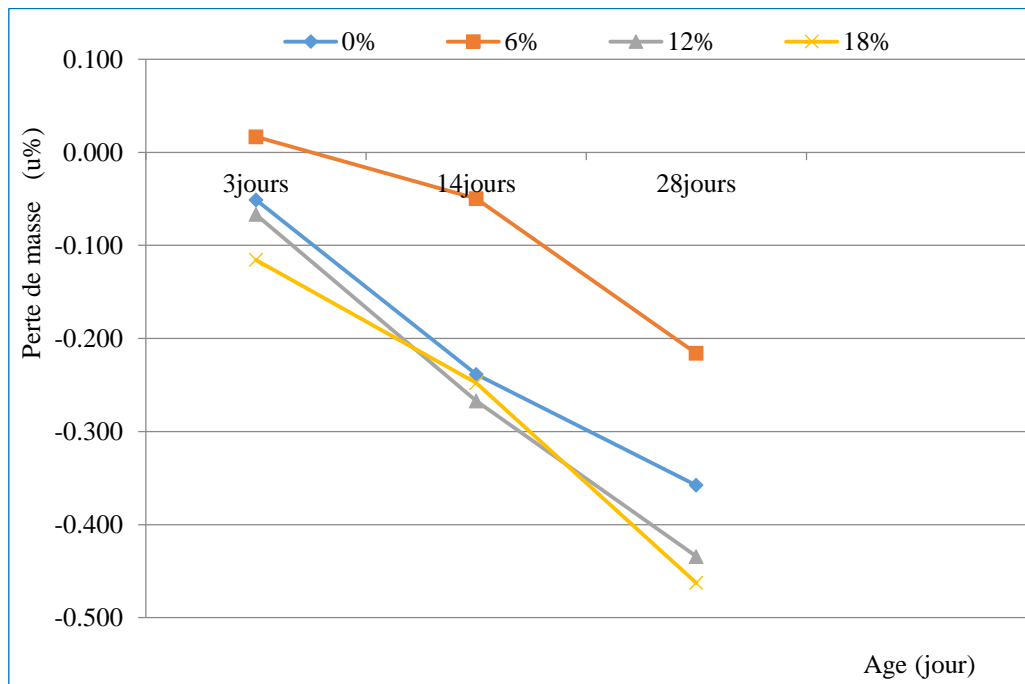


Figure IV-17: Variation de la perte de masse des matériaux en fonction de la période d'immersion dans 4% de KOH

Tous les matériaux présentent un gain de masse, le gain minimal est donné par le matériau à base de 18% de taux de substitution. Le gonflement maximal est donné par le matériau témoin à base de 0% de taux de substitution.

c. Attaque des par NaCL

Les résultats relatifs au suivi de la variation de la perte de masse en fonction de la durée d'immersion des éprouvettes dans la solution d'acide chlorhydrique de NaCL de concentration, sont présentés dans la **Figure IV-18**.

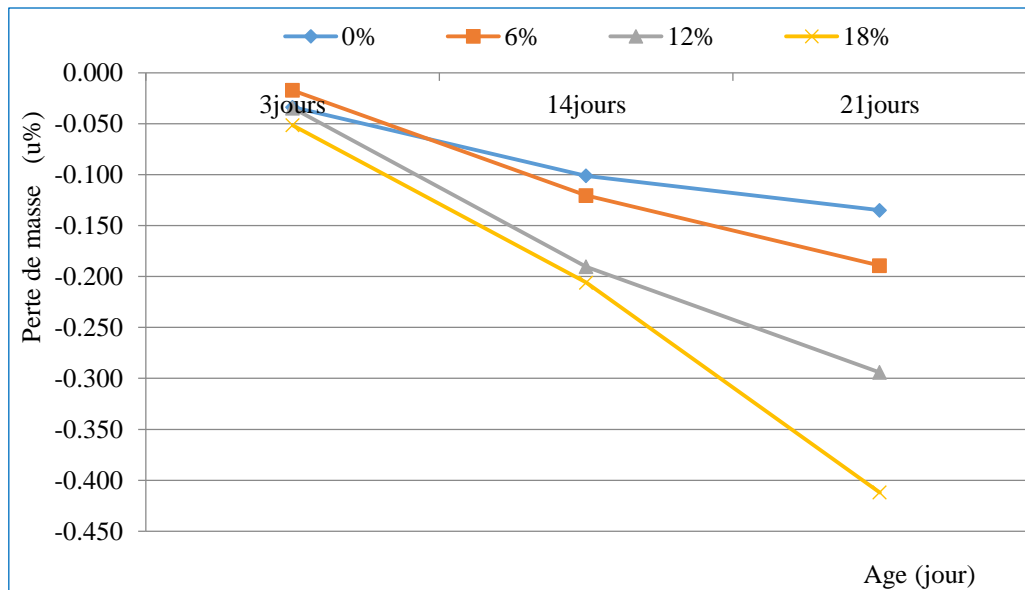


Figure IV-18: Variation de la perte de masse des matériaux en fonction de la période d'immersion dans 5% de NaCl

Dans la solution NaCl, on constate le même comportement que les matériaux conservés dans le KOH. Le matériau de 6% de taux de substitution ne présente aucune variation de masse.

IV.4. Conclusion

D'après cette étude on peut conclure que:

- L'ouvrabilité diminue en fonction de l'augmentation du taux de substitution,
- Le remplacement partiel du ciment par l'ajout de plâtre recyclé engendre une diminution de la densité à l'état durci,
- L'introduction des fillers recyclées engendre une diminution des résistances en compression quel que soit l'âge,
- La résistance en traction par flexion diminue en fonction de l'augmentation du taux de remplace du ciment par les fillers de plâtre recyclé quel que soit l'âge,
- L'indice de rebondissement et la vitesse ultrasonique diminuent à mesure que le taux de substitution augmente mais restent acceptable,
- La résistance en compression en fonction de l'augmentation de la température de traitement.
- D'une manière générale la résistance en traction par flexion des échantillons traités thermiquement est plus faible en comparaison avec les échantillons non traité,
- Le retrait des matériaux à base de plâtre recyclé diminue en fonction de l'augmentation du taux de substitution pour atteindre des valeurs minimales à 6%,
- Le gonflement minimal est enregistré dans le matériau témoin,

- Le coefficient d'absorption augmente au fur à mesure que le taux de substitution augmente,
- L'absorption capillaire augmente avec l'âge d'immersion,
- L'ajout de fillers de plâtre recyclés au béton augmente leur porosité accessible à l'eau,
- Le gonflement maximal est donné par le matériau témoin à base de 0% de taux de substitution dans le milieu KOH,
- Le matériau de 6% de taux de substitution ne présente aucune variation de masse dans la solution NaCl.

Conclusions générales

Conclusions générales

D'après cette étude on peut conclure que:

- L'ouvrabilité diminue en fonction de l'augmentation du taux de substitution,
- Le remplacement partiel du ciment par l'ajout de plâtre recyclé engendre une diminution de la densité à l'état durci,
- L'introduction des fillers recyclés engendre une diminution des résistances en compression quel que soit l'âge,
- La résistance en traction par flexion diminue en fonction de l'augmentation du taux de remplacement du ciment par les fillers de plâtre recyclé quel que soit l'âge,
- L'indice de rebondissement et la vitesse ultrasonique diminuent à mesure que le taux de substitution augmente mais restent acceptable,
- La résistance en compression en fonction de l'augmentation de la température de traitement.
- D'une manière générale la résistance en traction par flexion des échantillons traités thermiquement est plus faible en comparaison avec les échantillons non traité,
- Le retrait des matériaux à base de plâtre recyclé diminue en fonction de l'augmentation du taux de substitution pour atteindre des valeurs minimales à 6%,
- Le gonflement minimal est enregistré dans le matériau témoin,
- Le coefficient d'absorption augmente au fur à mesure que le taux de substitution augmente,
- L'absorption capillaire augmente avec l'âge d'immersion,
- L'ajout de fillers de plâtre recyclés au béton augmente leur porosité accessible à l'eau,
- Le gonflement maximal est donné par le matériau témoin à base de 0% de taux de substitution dans le milieu KOH,
- Le matériau de 6% de taux de substitution ne présente aucune variation de masse dans la solution NaCl.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] CHAZELLES, C.-A. de, La construction en brique crue moulée dans les pays de la Méditerranée du Néolithique à l'époque romaine. Réflexions sur la question du moulage de la terre.,3. Actes Du Colloq. Int. Les Cult. Constr. La Brique Crue, Toulouse, Montpellier, Ed. Espérou, 2011, p. 153-164., n.d.

[2] Chennaoui Youcef, Le matériau pisé à Cherrhell : un autre type d'architecture en terre, Nature et filiation. MEDITERRA 2009 Proceedings, Monfalcone. Edicom Ed. Ital., (2009),437-449.

[3] Julie THERRIEN-TRUCHON. 2012 ; COMPORTEMENT SISMIQUE DES MURS DE REMPLISSAGE EN MACONNERIE DE TUILES STRUCTURALES D'ARGILE.

[1] Afnor EDITIONS - Normes - NF EN 933 1 mai 2012 Numéro de tirage 2 -01/11/2020 Parenté européenne EN 933-1:2012.

[2] Afnor EDITIONS - Normes - NF EN P18-555 décembre 1990 Numéro de tirage 1 - 01/02/1991.

[3] Afnor EDITIONS - Normes - NF EN 1097-6 juin 2001 Numéro de tirage 1 - 13/07/2001 Parenté européenne EN 1097-6:2000.

[4] Afnor EDITIONS - Normes - NF EN 933-9 février 2022 Numéro de tirage 2 - 01/03/2022 Parenté européenne EN 933-9:2022.

[5] Afnor EDITIONS - Normes - NF EN 933-8 mars 2012 Numéro de tirage 1 - 01/03/2012 Parenté européenne EN 933-8:2012.

[6] Afnor EDITIONS - Normes - NF EN P18-555 décembre 1990 Numéro de tirage 1 - 01/02/1991.

[7] Afnor EDITIONS - Normes - NF EN P18-011 mars 2016 Numéro de tirage 1
Références bibliographiques

[1] Afnor EDITIONS - Normes - NF EN 12350-2 juin 2019 Numéro de tirage 1 Parenté européenne EN 12350-2:2019.

[2] Afnor EDITIONS - Normes - NF EN 196-1 Publiée le : 24/09/2016.

[3] Afnor EDITIONS - Normes - NF EN 12350-2 février 1994 Numéro de tirage 1 - 01/02/1994.

[4] Norme réglementation NBN B 15-215 Date de publication:2018 Belastingen op constructies

- Deel 1-7 : Algemene belastingen - Buitengewone belastingen : stootbelastingen en ontploffingen - Nationale bijlage.

[5] Norme réglementation NBN EN 1925 : 1999 Buildwise, anciennement CSTC, a été fondé en 1959 par le domaine de la construction.

[6] ASTM C- 267-97 Arliguie G., Hornain H. 2007. Grandeurs associées à la durabilité des bétons 'GranDuBé'. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussée