



Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche

scientifique Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie

Domaine : ST

Département de GENIE CIVIL

Filière : GENIE CIVIL

N° : ...

Option : Matériaux

Mémoire présenté pour l'obtention

Du diplôme de Master Académique

Par :

OUAIL Olia

Thème

**Etude de l'élaboration et caractérisation des bordures en micro-béton
par la valorisation des déchets de brique**

Soutenu devant le jury composé par :

Beddar Miloud	Professeur	Président
Rahmouni Zine El Abidine	Professeur	Encadrant
Tebbal Nadia	Professeur	Co-Encadrant
Bibi Mekki	Professeur	Examineur

Année universitaire : 2025/2026.

REMERCIEMENT

Avant tout, je remercie Allah le Tout-Puissant pour Sa grâce, Son aide et Son soutien tout au long de mon parcours.

« Et ma réussite ne dépend que d'Allah, le Très-Haut, le Tout-Puissant. »

Louange à Allah qui m'a honorée en couronnant mon chemin par la réussite et qui m'a accordé la force et la patience nécessaires pour accomplir ce travail.

Je tiens particulièrement à dédier ce modeste travail à mes très chers parents, ma mère et mon père, qu'Allah les préserve, pour leur amour, leurs sacrifices, leurs encouragements constants et leurs prières qui ont toujours été ma source de motivation et de réussite.

Je dédie également cette réussite à toutes les personnes que ma plume a pu oublier de citer, mais que mon cœur n'oubliera jamais.

Enfin, je prie Allah d'accorder à chacun réussite, bonheur et prospérité.

Et notre dernière invocation est :

« Louange à Allah, Seigneur des Mondes.»

RÉSUMÉ : Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre de la valorisation des déchets de construction et de démolition à travers leur recyclage dans les matériaux cimentaires. L'objectif principal est d'étudier l'influence de la substitution partielle des granulats naturels (sable et gravillons 3/8) par des débris de brique de récupération sur les performances physiques, mécaniques et hydriques d'un micro-béton. L'étude expérimentale s'articule autour de deux axes : une première série évaluant la substitution exclusive du sable naturel par du sable de brique (5 %, 10 % et 15 %), et une seconde série analysant une substitution combinée avec des gravillons de brique (3/8). Les éprouvettes confectionnées ont été soumises à des essais à l'âge de 7, 14 et 28 jours de cure par immersion. Les résultats obtenus mettent en évidence qu'un remplacement exclusif du sable naturel engendre une augmentation de l'absorption d'eau (jusqu'à 6,44 %) et une baisse de la résistance à la compression (chutant à 41,52 MPa à 28 jours), en raison de la porosité de la brique et de l'augmentation du rapport E/C. En revanche, l'approche combinée de la seconde série révèle des résultats prometteurs : la formulation B06 (5 % sable et 5 % gravillons de brique) avec un rapport E/C optimisé à 0,35 a permis d'atteindre une résistance exceptionnelle de 82,18 MPa à 28 jours, surpassant largement le béton témoin. Cette étude démontre ainsi la faisabilité technique de concevoir des micro-bétons éco-efficaces de hautes performances en ajustant rigoureusement la formulation et l'adjuvant.

Mots-clés : Micro-béton, Déchets de brique, Recyclage, Substitution granulaire, Absorption d'eau, Résistance à la compression, Durabilité.

ABSTRACT: This research project focuses on the recovery of construction and demolition waste by recycling it into cementitious materials. The main objective is to investigate the influence of partially substituting natural aggregates (sand and 3/8 gravel) with recycled brick waste on the physical, mechanical, and hydric performance of a micro-concrete. The experimental study is structured around two phases: a first series evaluating the exclusive substitution of natural sand with brick sand (5%, 10%, and 15%), and a second series analyzing a combined substitution with recycled brick gravel (3/8). The prepared specimens were tested at 7, 14, and 28 days of water curing. The results show that the exclusive replacement of natural sand leads to an increase in water absorption (up to 6.44%) and a decrease in compressive strength (dropping to 41.52 MPa at 28 days), due to the porosity of the brick and the required increase in the W/C ratio. Conversely, the combined approach in the second series delivers promising results: the B06 formulation (5% brick sand and 5% brick gravel) with an optimized W/C ratio of 0.35 achieved an exceptional compressive strength of 82.18 MPa at 28 days, significantly outperforming the control concrete. This study demonstrates the technical feasibility of designing eco-efficient, high-performance micro-concretes by strictly adjusting the mix design and the use of chemical admixtures.

Keywords: Micro-concrete, Brick waste, Recycling, Aggregate substitution, Water absorption, Compressive strength, Durability.

الملخص :

يأتي هذا البحث في إطار تثمين نفايات البناء والهدم من خلال إعادة تدويرها واستعمالها في المواد الإسمنتية. ويهدف أساساً إلى دراسة تأثير الاستبدال الجزئي للركام الطبيعي (الرمل والحصى 8/3) بمخلفات الطوب المعاد تدويره على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والهيدرولوجية للخرسانة الدقيقة (Micro-béton).

اعتمدت الدراسة التجريبية على محورين رئيسيين: تمثل الأول في تقييم الاستبدال الحصري للرمل الطبيعي برمل الطوب بنسب (5% و 10% و 15%) بينما تناول الثاني الاستبدال المشترك باستعمال حصى الطوب المعاد تدويره (8/3). وقد خضعت العينات المصنوعة لاختبارات بعد 7 و 14 و 28 يوماً من المعالجة بالماء.

أظهرت النتائج أن الاستبدال الحصري للرمل الطبيعي يؤدي إلى زيادة امتصاص الماء بنسبة تصل إلى 6.44%، مع انخفاض مقاومة الضغط إلى 41.52 ميغاباسكال عند عمر 28 يوماً، وذلك بسبب المسامية العالية للطوب وارتفاع نسبة الماء إلى الإسمنت (E/C). في المقابل، أظهرت نتائج السلسلة الثانية فعالية واعدة، حيث حققت الخلطة (5% B06 رمل طوب و 5% حصى طوب) مع نسبة ماء/إسمنت محسنة قدرها 0.35 مقاومة ضغط استثنائية بلغت 82.18 ميغاباسكال عند عمر 28 يوماً، متفوقة بشكل واضح على الخرسانة المرجعية.

وتؤكد هذه الدراسة إمكانية تصميم خرسانة دقيقة عالية الأداء وصديقة للبيئة من خلال الاستغلال الأمثل لمخلفات الطوب، مع التحكم الدقيق في تركيبة الخلطة واستعمال المضافات الكيميائية المناسبة.

Sommaire

Remerciement

الملخص

Résumé

INTRODUCTION GENERALE 8

CHAPITRE I : Fondamentaux du beton et du micro-beton

I.1 Introduction 12

I.2. Définition du béton 12

I.3 Composition des bétons 12

I.4 Réaction d'hydratation du ciment 13

I.5 Propriétés du béton 14

I.6 Le micro-béton 14

I.7 Caractéristiques du micro-béton..... 15

I.8 Les bordures en béton 15

- Définition 15

- Types de bordures 15

I.2 Les déchets de brique 16

I.2.1 Origine des déchets de brique..... 16

I.2.2 Définition des déchets de brique 16

I.2.3 Types de brique 17

I.2.4 Valorisation des déchets de construction 18

I.2.5 Utilisation dans les matériaux cimentaires 20

I.2.6 Influence des déchets de brique sur les propriétés du béton 20

I.2.7 Conclusion	21
CHAPITRE II : Matériaux utilisés et programme expérimental	
II.1 Introduction	23
II.2. Objectifs du chapitre	23
II.3 Caractérisation des matériaux	24
II.3.1 sable	24
II.3.1.1. Les essais sur sable	25
▪ Masses volumiques	25
▪ Equivalent de sable	26
▪ Analyse granulométrique	28
II.3.2 Ciment	29
II.3.3 Eau	30
II.3.4 : Adjuvant utilisé	30
II.3.5 Granulats	31
II.3.5.1. Les essais sur Granulats	32
▪ Masses volumiques	32
▪ Analyse granulométrique	33
II.3.6 Déchets de brique	35
II.3.6.1. Les essais sur déchets de brique	
▪ Masses volumiques	35
▪ Analyse granulométrique	36
II.7 Conclusion	38
CHAPITRE III : Résultats et interprétations	
III.1 Introduction	40
III.2. Formulation des Bétons	40
III.3. Les compositions	40
III.1 Première série : Substitution du sable par le sable de brique	41

III.1. Formulations étudiées	41
III.1.1 Résistance à la compression	42
III.2.2 Masse volumique	43
III.2.3 Absorption d'eau	46
III.2 Deuxième série : Substitution combinée du sable et des gravillons par les déchets de brique	48
III.2 Formulations étudiées	48
III.2.1 Résistance à la compression	49
III.2.2 Masse volumique	50
III.2.3 Absorption d'eau	52
III.3 Analyse comparative des deux séries	54
III.3.1 Résistance à la compression	54
III.3.2 Masse volumique	55
III.3.3 Absorption d'eau	56
III. Conclusion	57
CONCLUSION GÉNÉRALE	59
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	61
ANNEXES :	
Annexe : Photos des essais	58

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) traverse une mutation sans précédent, dictée par l'urgence climatique et la raréfaction des ressources naturelles. Partout dans le monde, et particulièrement en Algérie, l'industrie du béton consomme chaque année des milliards de tonnes de granulats naturels (sables et graviers), provoquant l'épuisement des gisements terrestres et le dragage intensif des cours d'eau. Parallèlement, la démolition de structures anciennes, les restructurations urbaines et les rebuts de fabrication industrielle génèrent des volumes considérables de déchets solides qui finissent, dans la majeure partie des cas, enfouis dans des décharges sauvages, saturant les espaces fonciers et dégradant l'environnement.

Face à ce double défi environnemental et économique, le concept d'économie circulaire appliqué aux matériaux de construction s'impose comme une alternative incontournable. Parmi les déchets de déconstruction les plus abondants figurent les débris de brique en terre cuite. Issus de la démolition de bâtiments ou des pertes de production des briqueteries, ces matériaux possèdent des propriétés physiques et chimiques intéressantes (porosité, angularité, réactivité pouzzolanique potentielle sous forme de fines) qui incitent à étudier leur réintégration dans la formulation de nouveaux mélanges cimentaires, notamment sous la forme de micro-bétons éco-efficaces.

L'objectif principal de ce projet de fin d'études est de valoriser ces déchets de brique de récupération en tant que substituts partiels ou combinés des granulats naturels. Il s'agit d'analyser rigoureusement comment l'incorporation de sable de brique et de gravillons de brique recyclés modifie le comportement du matériau, tant à l'état frais qu'à l'état durci, en suivant l'évolution de ses performances à différentes échéances (7, 14 et 28 jours).

Pour répondre à cette problématique, notre travail de recherche s'articule autour de trois chapitres principaux :

* Le Chapitre I présente une synthèse bibliographique sur la technologie du béton, les propriétés des micro-bétons et les travaux de recherche existants concernant la valorisation des déchets de déconstruction dans les matrices cimentaires.

* Le Chapitre II détaille la phase expérimentale, incluant la caractérisation des matériaux de base (ciment, eau, adjuvant, granulats naturels et de brique), ainsi que les protocoles des essais physiques, mécaniques et hydriques mis en œuvre.

* Le Chapitre III est consacré à la présentation, l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus sur les huit formulations élaborées, mettant en relief l'impact de la substitution granulaire sur la masse volumique, l'absorption d'eau et la résistance à la compression.

Enfin, une conclusion générale synthétisera les principaux enseignements de cette étude et ouvrira des perspectives sur la durabilité et l'application industrielle de ces nouveaux micro-bétons recyclés.

CHAPITRE 1 :

FONDAMENTAUX DU BETON ET DU MICRO-BETON

I.1 Introduction :

Le **béton de ciment** s'est imposé comme le matériau de construction le plus utilisé au monde, **juste après l'eau**. Cette **prédominance** s'explique par sa grande disponibilité, son coût avantageux et ses performances mécaniques élevées. **Élément structurel incontournable** du génie civil, il constitue **l'ossature** de la majorité des infrastructures modernes, des bâtiments résidentiels aux **ouvrages d'art complexes tels que les ponts et les barrages**.

Toutefois, **l'omniprésence** du béton soulève aujourd'hui des enjeux environnementaux majeurs. Sa production est **particulièrement énergivore** et génère d'importantes émissions de CO₂.

I.2 Définition du béton :

Le béton est un matériau **composite** constitué de **granulats (fillers, sables, gravillons)**, de ciment, d'eau et, **généralement**, d'adjuvants. Ces composants présentent des caractéristiques très hétérogènes : leurs masses volumiques **varient**, pour les bétons courants, de 1000 kg/m³, pour l'eau à 3100 kg/m³ pour le ciment. Les dimensions de leurs grains **s'étendent du micromètre** pour les **finesses du ciment** jusqu'à 20 ou 30mm pour les **plus gros granulats**.

Pour **optimiser l'usage** du béton, il est essentiel de maîtriser ses propriétés selon son stade d'évolution : **à l'état frais**, sa **maniabilité** permet sa mise en œuvre dans les coffrages ; **à l'état durci**, sa géométrie est fixée, mais ses **caractéristiques physico-chimiques** continuent d'évoluer **pendant plusieurs mois**.

Selon les spécificités de chaque projet (disponibilité des ressources, nature de l'ouvrage, techniques de coulage), un cahier des charges est établi afin de **définir l'ensemble des performances** auxquelles doit répondre le béton à **formuler**. [1] [2].

I.3 Composition des bétons :

La formulation d'un béton consiste à **déterminer** les proportions **optimales** de ses différents constituants **afin de répondre aux exigences de mise en œuvre, de résistances mécaniques et de durabilité** [5, 7, 13]. **Quelle que soit l'approche retenue**, les méthodes de formulation suivent les mêmes **étapes fondamentales** :

- **Choix du squelette granulaire** : Définition du mélange de gravillons et de sable et du diamètre maximal des granulats (D_{max}). Le squelette doit être **conforme à un fuseau de**

référence (ou fuseau granulaire), obtenu par **l'analyse de courbes granulométriques** de bétons ayant **démontré leurs performances** lors de projets antérieurs.

□ **Choix du liant et du rapport E/C** : Sélection de la **classe de ciment** et fixation du rapport eau/ciment, **paramètre clé de la porosité et de la résistance**.

□ **Dosage des constituants** : Détermination de la quantité de ciment et, **par déduction volumétrique**, du volume total des granulats.

• **Optimisation chimique** : Choix des adjuvants et **ajustement de leurs dosages par des essais de convenance en laboratoire**.

Il est à noter que la nature des granulats est souvent conditionnée par les ressources géologiques des carrières locales desservant le site de production. Il existe plusieurs méthodes de formulation (Bolomey, Abrams, Faury, Valette, Joisel...). La section suivante détaille les principes des méthodes de Bolomey et de Dreux-Gorisse, celles-ci étant les plus couramment appliquées dans le contexte du génie civil en Algérie. [1] [3].

I.4 Réaction d'hydratation du ciment :

La réaction d'hydratation du ciment est un phénomène **physico-chimique** complexe qui débute dès le contact entre le ciment et l'eau. Elle conduit à la formation de **plusieurs phases hydratées**, dont les plus **prépondérantes** sont les silicates de calcium hydratés (C-S-H), **principaux vecteurs de la cohésion et** de la résistance **mécanique** du béton, ainsi que l'hydroxyde de calcium (**appelé aussi portlandite**).

Cette réaction se déroule en plusieurs **étapes (induction, accélération, ralentissement)** et se poursuit **sur le long terme**, ce qui explique l'augmentation progressive de la résistance du béton avec l'âge. La maîtrise de **la cinétique** de cette réaction est essentielle pour garantir les performances **et la durabilité** du matériau. [4].

I.5 Propriétés du béton :

Les propriétés du béton évoluent de manière significative selon son état, qu'il soit frais ou durci.

À l'état frais, le béton se caractérise par sa consistance, sa maniabilité et son ouvrabilité, qui déterminent sa facilité de mise en œuvre dans les coffrages. Ces propriétés dépendent étroitement du rapport eau/ciment (E/C), de la distribution granulométrique et de l'action éventuelle d'adjuvants (plastifiants ou superplastifiants).

À l'état durci, le béton présente des **performances** mécaniques importantes, **au premier rang desquelles figure** sa résistance à la compression. Il possède également une certaine résistance à la traction, bien que celle-ci soit **considérée comme négligeable (environ 1/10ème de la résistance en compression)**. D'autres caractéristiques, telles que la durabilité, la **porosité**, la perméabilité et la résistance aux agressions chimiques, sont également essentielles pour assurer la **pérennité** des ouvrages. [3].

Si le béton traditionnel repose sur un squelette granulaire grossier, l'évolution des techniques de formulation a permis l'émergence du **micro-béton**, caractérisé par une granulométrie réduite et des propriétés d'adhérence supérieures.

I.6 Le micro-béton :

Le micro-béton est une variante du béton traditionnel, caractérisée par l'utilisation exclusive de **fines et de granulats de petit calibre**, généralement **avec un diamètre maximal inférieur à 5 ou 8mm**. Il se distingue par une homogénéité accrue et une finesse de texture, ce qui le rend particulièrement adapté aux éléments de faible épaisseur ou présentant des géométries complexes.

Ce type de béton est largement utilisé dans les travaux de réhabilitation structurelle, les éléments préfabriqués architecturaux et les structures nécessitant une haute précision de coulage. Sa formulation spécifique permet d'obtenir un matériau très compact, offrant une excellente compacité et une distribution granulaire optimale. Le micro-béton est souvent formulé avec des adjuvants spécifiques pour garantir une forte adhérence et un retrait limité. [3] [5].

I.7 Caractéristiques du micro-béton :

Le micro-béton présente plusieurs avantages comparatifs par rapport au béton conventionnel. Il offre une excellente maniabilité (rhéologie), facilitant ainsi le remplissage des moules et la réalisation d'éléments aux géométries complexes. Sa structure microscopique homogène contribue à optimiser ses performances mécaniques et sa pérennité.

En outre, l'absence de gros granulats permet de minimiser la porosité et les défauts d'interface, tout en garantissant un parement (état de surface) plus lisse et esthétique. Cependant, sa formulation exige un contrôle rigoureux, car la grande surface spécifique des particules fines induit une demande en eau plus importante, ce qui nécessite souvent l'usage de superplastifiants haut réducteurs d'eau pour éviter un retrait excessif. [1] [3].

I.8 Les bordures en béton :

Les bordures en béton sont des éléments **de voirie** préfabriqués utilisés dans l'aménagement urbain et routier. Elles jouent un rôle **structurel et sécuritaire** essentiel dans la délimitation des chaussées, la protection des trottoirs et **le drainage (guidage des eaux de ruissellement)**.

Ces éléments doivent répondre à des exigences strictes en termes de **résistance à la flexion et à l'abrasion**, afin de supporter les **sollicitations dynamiques** et les chocs, ainsi qu'à des critères de durabilité **face aux agents agressifs** et aux conditions climatiques. Le micro-béton est particulièrement adapté à leur fabrication en raison de sa **grande compacité**, de sa facilité de mise en œuvre et de ses **performances mécaniques élevées**. [NF EN 1340]. L'optimisation de ces formulations ouvre la voie à l'intégration de **granulats de brique recyclée**, une approche de **valorisation des sous-produits industriels** qui sera détaillée dans le chapitre suivant afin d'évaluer son impact sur les performances du micro-béton. [6].

Les déchets de brique et leur valorisation

I.2.1 Introduction :

Avec l'augmentation continue des activités de construction et de démolition (**C&D**), la gestion des déchets issus de ces opérations est devenue un enjeu majeur à l'échelle mondiale. Parmi ces **rebut**s, les déchets de brique occupent une place **prépondérante**, notamment dans les régions où la **maçonnerie de terre cuite** est le mode constructif dominant. Leur accumulation **dans les décharges** représente un problème environnemental significatif, **incitant la communauté scientifique** à explorer des solutions innovantes pour leur **valorisation en tant que granulats alternatifs**.

Dans ce contexte, l'intégration des déchets de brique dans les **matrices cimentaires**, en particulier dans le béton, apparaît comme une alternative prometteuse. Cette approche s'inscrit dans une démarche de **développement durable et d'économie circulaire**, visant à réduire l'**empreinte carbone** du secteur tout en optimisant l'utilisation des ressources **naturelles**.

Ces différentes sources contribuent à la production massive de déchets de brique, souvent **stockés de manière anarchique** sans traitement préalable, ce qui accentue leur impact **écologique**. [RILEM ; Pacheco-Torgal, 2013].

I. 2.2 Les déchets de brique :

Les déchets de briques sont issus de l'industrie des **produits rouges (ou terre cuite)**. Ces matériaux comptent parmi les plus anciens **constituants** de construction ; ce sont des produits céramiques **élaborés à partir d'argiles sélectionnées** faisant office de matière première, auxquelles sont parfois ajoutés des **adjuvants minéraux** [7].



Figure 1. Les déchets de brique

I.2.3 Types de brique :

- **Selon leur utilisation :**

- **Face brique :**

Briques de parement sont ceux utilisés pour décorer l'extérieur d'un bâtiment. Ils sont les briques les plus visibles, de sorte qu'ils sont de meilleure qualité et plus durable. Découper Fil briques sont un exemple de briques de parement : Ces briques sont faites avec de l'argile, texturé, puis couper par fil. Ce sont donc moins cher à produire en grandes quantités. Ils sont disponibles en différentes couleurs et textures [8].

- **Briques de construction :**

Briques de construction sont le type de briques le plus couramment utilisé. Elles sont faites d'argile, et cuits dans des fours pour les rendre dur et fort. Ils sont utilisés dans la construction des murs et autres surfaces, et non pour les extérieurs, afin qu'ils ne viennent pas en différentes textures ou couleurs. Ils sont durs et durable [8].

- **Briques vernissées :**

Briques vernissées ont un côté recouvert de revêtement vitré (généralement en céramique).

Le regard glacé provient de la fusion de différents minéraux et des ingrédients lorsque les briques sont brûler ou cuits. La surface vitrée rend ces briques mieux adaptées pour les hôpitaux, les laboratoires, les laiteries et autres bâtiments où le maintien de conditions sanitaires est très essentiel [8].

- **Selon leur forme :**

- **Briques pleines :**

La brique pleine ordinaire a le format 6x11x22 cm (hauteur, largeur, longueur). Toujours employé, cet élément constitue d'excellents murs porteurs. Spécialement fabriquée pour l'exécution d'éléments 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 (assises) et 1 cm pour les verticaux [8].

Briques perforées et blocs perfores :

La maçonnerie de briques perforées 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 [8]

Briques creuses :

Les briques creuses, beaucoup plus légères, et de plus grandes dimensions, permettent la réalisation de murs spécialement isolants. Ces produits ouverts aux deux extrémités, comportent des cloisonnements intérieurs longitudinaux continus sur toute la longueur. 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 séparations intérieures de bâtiments [8].

Les briques creuses qui comportent au moins quatre conduits non débouchant sont fabriqués par voie demi-sèche. Ces briques doivent avoir les dimensions suivantes : 250x 120x88mm ou bien 65mm. On fabrique les briques à 8 et 18 conduits dont les diamètres sont de 35 à 45mm et de 17 à 18mm. Les trous de la perforation sont faits soit verticalement dans la proportion de 60% de la section totale, soit horizontalement avec alvéoles parallèles au lit de pose dans la proportion de 40% de la section totale. On classe les briques creuses en quatre catégories : 150, 125, 100 et 75. La capacité d'absorption d'eau.

I.2.4 Valorisation des déchets de la brique :

L'utilisation des déchets de brique comme **granulats alternatifs** ou **additions minérales** constitue une stratégie pertinente pour la durabilité du secteur de la construction. Ces déchets peuvent être concassés pour **substituer partiellement ou totalement les granulats naturels** (sables ou gravillons), contribuant ainsi à la préservation des ressources et à l'**allègement des structures**.

La littérature scientifique fait état de nombreux travaux sur la valorisation de ces matériaux :

- [Tavakoli et al., 1996] ont mis en évidence que l'usage de brique pilée comme **fines** augmente la **capacité d'absorption d'eau** . Toutefois, l'ajout de nano-SiO₂ permet de compenser cet effet en **densifiant la microstructure** , améliorant ainsi la durabilité et les propriétés thermiques.
- [Bourmatte, 2004] a exploré la substitution du sable par des granulats recyclés dans les mortiers. Ses résultats indiquent une **corrélation négative entre le taux de substitution et la résistance à la compression** , suggérant un dosage optimal limité pour maintenir les performances mécaniques.
- [Moriconi, 2009] a souligné que l'utilisation de décombres de maçonnerie, que ce soit en remplacement du sable ou du ciment, entraîne une **chute de résistance** par rapport au mortier de référence, principalement due à la porosité du matériau recyclé.
- [Kanai et Debieb, 2011] ont démontré que l'intégration de briques cuites concassées augmente la **perméabilité et la profondeur de pénétration d'eau** , celle-ci pouvant doubler pour une substitution totale, ce qui affecte directement la durabilité face aux agents agressifs.
- Lahmadi et al., 2012] précisent que si la substitution des gros granulats (30 à 50%) donne des résultats comparables au béton ordinaire, le remplacement total du squelette granulaire est **fortement déconseillé** , car il provoque une perte de résistance de l'ordre de 50%.
- [Heikal, 2013] a révélé qu'en tant qu'addition fine, la poudre de brique peut améliorer la résistance grâce à un **effet pouzzolanique** . L'examen de la microstructure montre un arrangement dense de **C-S-H microcristallins** , optimisant la cohésion de la pâte de ciment.
- [Safi, 2013] a étudié l'impact sur les **Bétons Autoplaçants (BAP)** . Si le durcissement thermique (60°) accélère la prise, la **forte demande en eau** des granulats de brique reste un facteur limitant la fluidité à l'état frais.
- [Ranjodh et Kaushik, 2013] confirment que la poussière de brique peut être utilisée efficacement dans les BAP. Un dosage de 25% semble être le **seuil optimal** pour garantir à la fois l'étalement et une résistance à la compression supérieure. [18]

I.2.5 Utilisation des déchets de brique dans le béton :

L'intégration des déchets de brique dans le béton peut s'opérer selon **plusieurs modes de valorisation**. Ils peuvent être utilisés comme **substitut partiel du sable (granulats fins)**, ce qui permet de limiter la **surexploitation des gisements naturels**. Ils peuvent également être employés sous forme de **poudre ultra-fine (fines)** en tant qu'**ajout minéral**, jouant un rôle de **substitution partielle du ciment** grâce à leur **réactivité pouzzolanique** potentielle.

Les études expérimentales indiquent que des **taux de substitution modérés (généralement inférieurs à 25 %)** permettent de maintenir des performances mécaniques satisfaisantes. En revanche, des **dosages plus élevés** peuvent entraîner une **chute de la résistance à la compression**, principalement en raison de la **porosité intrinsèque de la brique** et d'une **demande en eau accrue** qui fragilise la **matrice cimentaire**.

I.2.6 Influence des déchets de brique sur les propriétés du béton :

L'incorporation des déchets de brique influence **significativement** les propriétés du béton. À l'état frais, elle **induit généralement une baisse de l'ouvrabilité** en raison de la **forte porosité ouverte** des particules, qui absorbent une partie de l'**eau de gâchage**. Ce phénomène nécessite souvent un ajustement du dosage en **adjuvants** ou une **pré-saturation des granulats** pour maintenir une **rhéologie** constante.

À l'état durci, cette incorporation affecte la résistance mécanique, la densité et la durabilité. Cependant, **sous forme de fines (brique pilée)**, ce matériau peut améliorer la **compacité granulaire** de la matrice cimentaire par un **effet de remplissage (filler)** et une éventuelle **activité pouzzolanique**, contribuant ainsi à une meilleure résistance à long terme. L'effet global reste donc **tributaire du taux de substitution**, de la finesse de broyage et des conditions **de cure**. [19]

Conclusion :

Cette étude aborde l'impact environnemental de l'industrie du bâtiment en proposant la valorisation des déchets de briques pour la fabrication de micro-béton durable. L'objectif est de trouver le taux de substitution optimal des granulats pour des bordures, en équilibrant performance et éco-conception à travers une démarche expérimentale structurée.

CHAPITRE II:

MATERIAUX UTILISES ET PROGRAMME

EXPERIMENTAL

II.1. Introduction

Le développement de nouveaux éco-matériaux s'inscrit aujourd'hui au cœur des stratégies de gestion des déchets de construction et de démolition. Dans cette perspective de développement durable, la valorisation de sous-produits industriels comme les déchets de brique représente une alternative écologique et économique majeure pour l'industrie du béton. L'intégration de ces résidus dans des matrices cimentières permet à la fois de limiter l'exploitation des ressources naturelles et de réduire l'empreinte carbone globale des infrastructures.

Les matériaux sélectionnés pour cette étude jouent un rôle fondamental dans la détermination des propriétés du micro-béton, tant à l'état frais qu'à l'état durci. Chaque constituant — à savoir le ciment, le sable, l'eau de gâchage et la poudre de brique de substitution — influence de manière significative la cinétique d'hydratation, la microstructure et les performances finales du composite. Afin d'évaluer l'impact de cette démarche environnementale, un programme expérimental basé sur quatre formulations distinctes a été élaboré, appliquant des taux de substitution partielle en déchets de brique de 0 %, 5 %, 10 % et 15 %.

II.2. Objectifs du chapitre

Ce chapitre expose la méthodologie systématique adoptée pour la sélection, l'identification et la caractérisation physico-chimique de l'ensemble des matières premières. L'analyse se structure autour de trois objectifs principaux :

- **Caractérisation intrinsèque** : Identifier les propriétés physiques, chimiques et géométriques de chaque constituant (ciment, sables, eau et brique broyée) par des essais normalisés.
- **Évaluation comparative** : Analyser l'influence des différents taux de substitution (0% à 15%) sur les propriétés physiques (porosité, absorption d'eau) et mécaniques (résistances en compression et en flexion) du micro-béton.
- **Optimisation de la formulation** : Déterminer le dosage optimal en déchets de brique permettant d'assurer le meilleur compromis possible entre les performances mécaniques à court/long terme et la durabilité du matériau.

Dans notre travail, la formulation du micro-béton s'appuie sur la méthode de l'académicien soviétique B.G. Scramtaiev, reconnue depuis 1960 pour son approche rationnelle basée sur la compacité du béton frais. Cette méthode postule que la somme des volumes absolus des constituants (ciment, eau, sable et déchets de brique faisant office de gravier) équivaut rigoureusement à 1 000 litres, considérant ainsi une porosité initiale nulle pour un volume d'un mètre cube (1m^3) de béton frais [20, 35]. Le protocole expérimental se déroule en plusieurs étapes successives : la caractérisation physique des matériaux de base, le calcul analytique du rapport ciment/eau suivi du la **détermination** des dosages, et enfin, une phase d'ajustement expérimental en laboratoire afin de garantir la fluidité et les résistances mécaniques ciblées [8].

II.3. Caractéristiques des matériaux utilisées

II.3.1. Sable :

Le sable utilisé dans cette recherche est un sable de dune provenant de la région de Djamaa, située dans la wilaya d'Oued Souf. Ce type de granulat se caractérise généralement par une forte finesse et une granulométrie très serrée, des propriétés physiques qui influencent directement la demande en eau de gâchage et la compacité finale du micro-béton lors de l'application de la méthode de Scramtaiev.



Figure II.1 : Sable de dune (Région de Djamaa, Wilaya d'Oued Souf).

II.3.1.1. Les essais sur sable :

➤ Masses volumiques :

Les propriétés physiques du sable de dune de Djamaa, indispensables aux calculs volumétriques de la méthode de Scramtaiev, ont été déterminées par des essais de caractérisation en laboratoire. Les résultats des mesures expérimentales de la masse volumique absolue (densité de la matière solide) et de la masse volumique apparente du sable utilisé sont consignés dans les tableaux ci-après :

- Masse volumique absolue [9].

Tableau II.1 : Masse volumique absolue du sable

N° d'essai	M(g)	V0 (ml)	V1 (ml)	$\rho \text{ abs}$ (g/cm ³)	$\rho \text{ abs Moy}$ (g/cm ³)
1	130.7	70	124	2.42	2.61
2	181	70	140	2.58	
3	253.2	70	170	2.53	
4	294.9	70	180	2.68	
5	324.4	70	190	2.70	
6	347.8	70	195	2.78	

M : Masse de sable, **V1** : Volume de l'eau, **V2** : Volume total (sable + eau).



Figure II.2 : Essai de mesure de la masse volumique absolue du sable

- **Masse volumique apparente** [10].

Tableau II.2 : Masse volumique apparente du sable

N° d'essai	M1 (g)	V (cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ app Moy(g/cm ³)
1	1456	0.9	1.617	1.589
2	1422	0.9	1.580	
3	1427	0.9	1.585	
4	1420	0.9	1.577	

ρ app : Masse volumique apparente

La détermination expérimentale de la masse volumique apparente du sable de dune a été réalisée en laboratoire à l'aide d'un récipient cylindrique de volume connu, conformément aux exigences des normes en vigueur. Le dispositif expérimental et l'appareillage de mesure utilisés pour cette manipulation sont illustrés par la **Figure II.3**.



Figure II.3 : Appareil de mesure de la masse volumique apparente

➤ **Equivalent de sable :**

Les mesures de hauteurs effectuées après décantation sur trois échantillons distincts ont permis de déterminer les valeurs de l'équivalent de sable visuel (ESV) et au piston (ESP). Les résultats de ces essais sont synthétisés dans le **Tableau II.3**.

Tableau II.3: Les résultats de l'équivalent de sable

N° d'essai	h1(cm)	h2(cm)	ESV(%)	h'2(cm)	ESP(%)
1	9.6	8.6	89.58	8.2	85.41
2	9.3	8.6	92.47	8.4	90.32
3	9.5	8.5	89.47	8.4	88.42
Moyenne	9.47	8.57	90.51	8.33	88.05

L'analyse des valeurs moyennes obtenues donne un Équivalent de Sable Visuel moyen (**ESV**) de **90,51 %** et un Équivalent de Sable au Piston moyen (**ESP**) de **88,05 %**. Selon les critères d'admissibilité des granulats définis par la réglementation (notamment pour les bétons de haute qualité ou soumis à des exigences strictes de durabilité où $ES > 80\%$ ou $ESP > 5$). Le sable de la région d'Oued Souf est un sable propre contenant un faible pourcentage de fines argileuses. Il est donc parfaitement adapté à la fabrication de bétons de haute qualité



Figure II.5 : Essai d'équivalent de sable (ES) du sable propre d'Oued Souf.

➤ Analyse Granulométrique:

l'analyse granulométrique du sable de dune d'Oued Souf (**Tableau II.5**) montre une distribution granulaire homogène, marquée par un refus majeur sur le tamis de 0,63 mm. **Notamment**, le module de finesse obtenu est de **2,61**, ce qui atteste d'une granularité optimale. Associée à un faible pourcentage de fines au fond du tamis, cette valeur confirme la haute propreté du sable et son excellente aptitude à la formulation de bétons de haute qualité. [11].

Tableau II.5 : Analyse granulométrique rectifiée du sable de dune d'Oued Souf

Tamis Ouverture (mm)	Refus du sable (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
5	0	0	0	100
2.5	6	6	0.40	99.60
1.25	56	62	4.15	95.85
0.63	918	980	65.64	34.36
0.315	399	1379	92.36	7.64
0.16	96	1475	98.79	1.21
Fond de tamis	18	1493	100	0.00
Total	1493	—	—	—

Calcul de Module de Finesse (M_f) rectifié :

$$M_f = \frac{0+0.40+4.15+65.64+92.36+98.79}{100} = 2.61$$

Un module de finesse de **2,61** confirme que ce sable de dune d'Oued Souf possède une granularité optimale pour la formulation de bétons de haute qualité, garantissant à la fois une excellente maniabilité et de bonnes résistances mécaniques. [11].

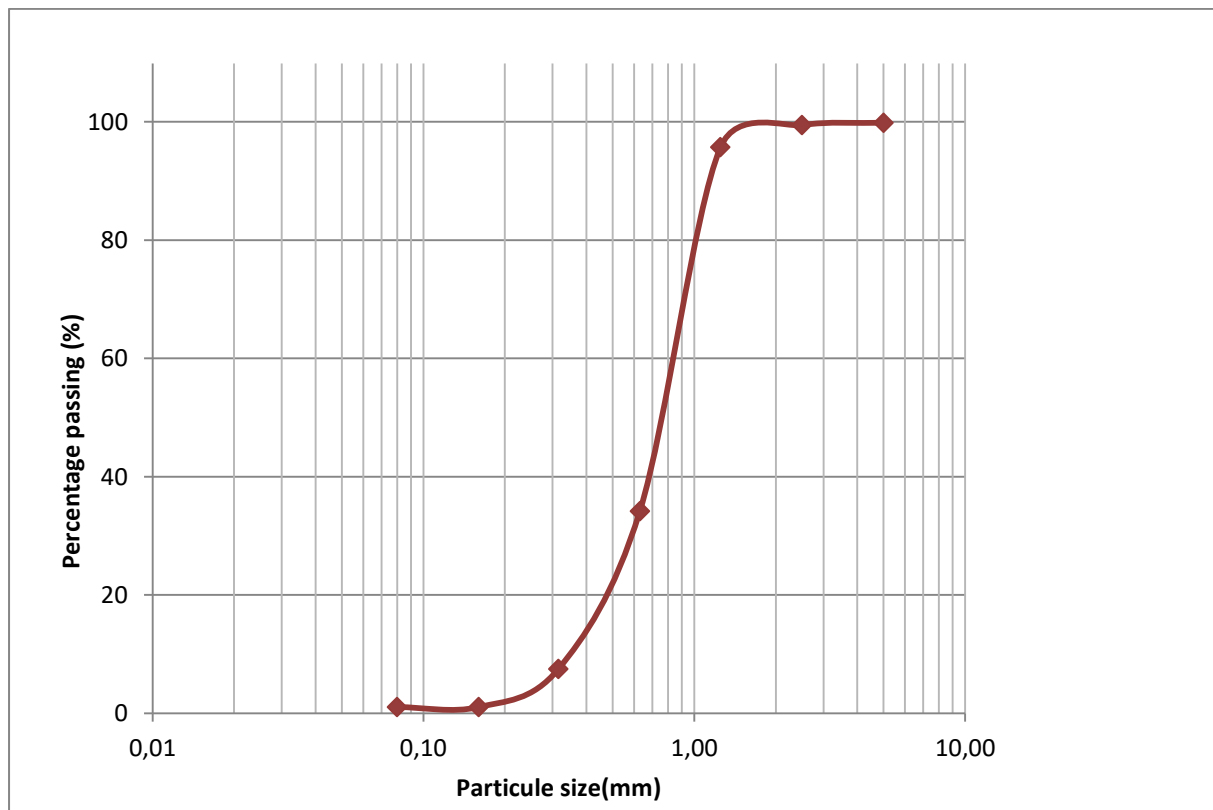


Figure II.6 : Courbe granulométrique du sable de dune d'Oued Souf

II.3.2:Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment Portland au calcaire de type **CEM II/B-L 42.5N**, produit par la SPA Biskria Ciment. Il contient une proportion d'ajouts minéraux, notamment du calcaire, comprise entre 21 % et 35 %. **Cet ajout** permet d'améliorer la maniabilité du mélange et de réduire la chaleur d'hydratation par rapport à un ciment Portland pur. Ce ciment se caractérise par une résistance mécanique de 42,5 MPa à 28 jours **et** une vitesse de prise normale (N). **Ces propriétés le rendent** adapté à la fabrication du béton, du mortier et du micro-béton, notamment pour les bordures et les éléments préfabriqués. Par ailleurs, il est conforme aux normes NA 442 (norme algérienne) et EN 197-1 (norme européenne). **Sa fabrication** sous un système de management de la qualité certifié ISO 9001 **garantit** la régularité et la fiabilité de ses propriétés physico-mécaniques. [12] [13].



Figure II.7 : Ciment Portland, CEM II / B-L 42.5N

II.3.3:Eau :

Dans cette étude, **de l'eau potable de laboratoire** a été utilisée pour le gâchage du micro-béton, conformément aux exigences des normes de **formulation** des matériaux cimentaires. [14].

II.3.4 : Adjuvant utilisé :

L'adjuvant utilisé dans cette étude est un plastifiant réducteur d'eau, commercialisé sous le nom de **Sikaplast® BV 40+**. Il est conçu pour améliorer les performances des bétons, **en optimisant leur ouvrabilité** tout en réduisant la quantité d'eau de gâchage. **Cet agent** permet d'obtenir une meilleure fluidité du mélange sans compromettre les résistances mécaniques. En effet, la diminution du rapport **eau/ciment (E/C)** contribue à l'augmentation des résistances mécaniques à court et à long terme. Par ailleurs, **le Sikaplast® BV 40+** améliore la cohésion du béton **et en limite** la ségrégation et **le** ressuage, **favorisant** une mise en œuvre optimale ainsi qu'un meilleur aspect de surface. De plus, ce produit est exempt de chlorures, ce qui le rend compatible avec les bétons armés sans risque de corrosion des armatures [15].



Figure II.8 Adjuvant utilisé : Sikaplast ® BV 40+

II.3.5. Granulats

Dans cette étude, des **gravillons de classes granulaires 3/8 et 8/16** ont été utilisés pour constituer le squelette granulaire du micro-béton. L'association de ces deux fractions vise à optimiser la compacité du mélange, à accroître ses performances mécaniques et à renforcer sa durabilité.



Figure II.9 : Gravillons utilisés dans l'étude : fraction 8/16 (à gauche) et fraction 3/8 (à droite)

La caractérisation physique des fractions granulaires 3/8 et 8/16 a donné les résultats consignés dans les **Tableaux II.6 et II.7** ci-après.

Tableau II.6 : Détermination de la masse volumique absolue des gravillons (fraction 3/8)

N° d'essai	M(g)	V0 (ml)	V1 (ml)	ρ abs (g/cm ³)	ρ abs Moy(g/cm ³)
1	80	152	162	2.5	2.539
2	110	152	174	2.619	
3	140	152	185	2.545	

Tableau II.7: Influence du mélange granulaire sur la masse volumique apparente et la porosité

N° d'essai	3/8 (%)	8/16 (%)	ρ_{app} (g /cm ³)	Porosité(%)
1	100	0	1.294	49.03
2	0	100	1.267	50.09
3	50	50	1.257	50.49
4	20	80	1.313	48.17
5	80	20	1.311	48.32
6	60	40	1.305	48.60
7	40	60	1.322	47.93

Le **Tableau II.8** présente l'analyse granulométrique des gravillons de fraction 3/8. Les données montrent que le matériau possède une granulométrie resserrée autour de la maille de 6.3 mm (avec un refus cumulé de 51.73%), ce qui valide son intégration dans le squelette granulaire du micro-béton.

Tableau II.8 : Analyse granulométrique de Gravier (3/8)

Tamis (mm)	Poids des Tamis vide(g)	Poids des Tamis + Gravier (g)	Refus du Gravier (g)	Refus Cumulés(g)	Refus Cumulés%	Tamisant Cumulés%
10	0.586	0.586	0	0	0	0
8	0.645	0.678	0.033	0.033	2.2	97.8
6.3	0.641	1.384	0.743	0.776	51.73	48.27
5	0.627	0.970	0.343	1.119	74.6	25.4
4	0.602	0.849	0.247	1.366	91.06	8.94
3.16	0.607	0.696	0.089	1.455	97	3
fond	0.453	0.498	0.045	1.500	100	0

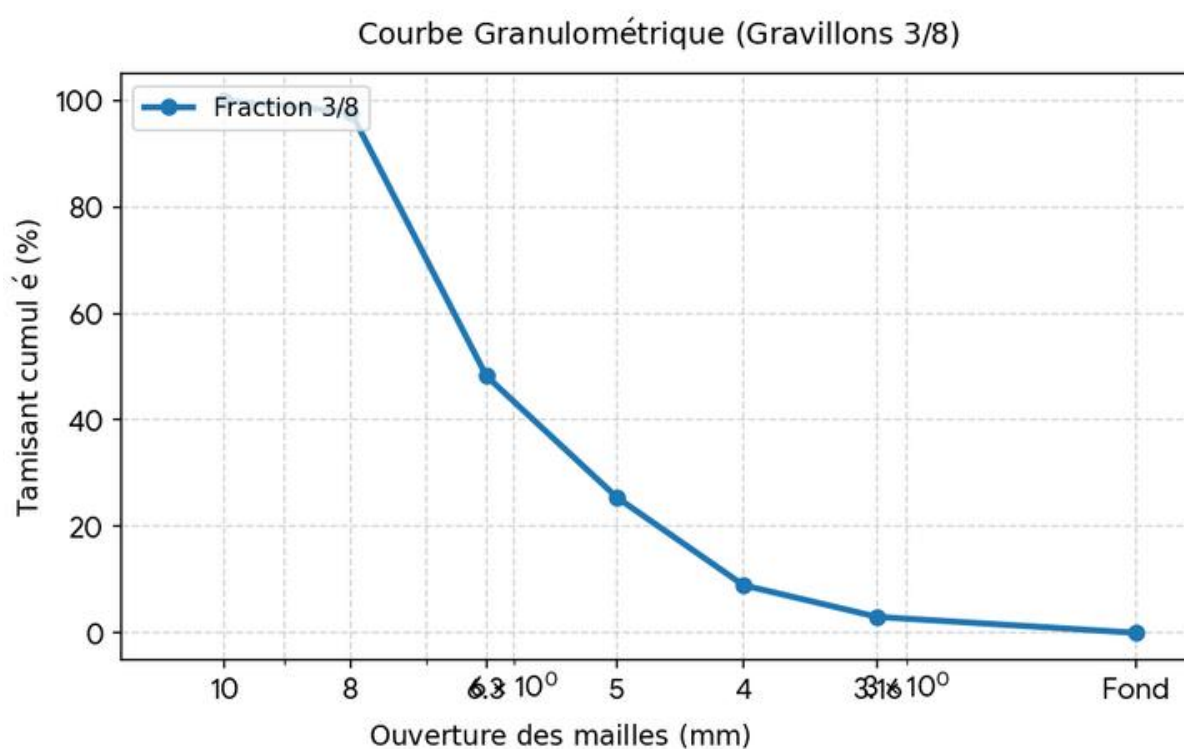


Figure II.10 : Courbe granulométrique des gravillons (fraction 3/8)

Parallèlement à l'étude de la fraction fine, la distribution dimensionnelle de la fraction grossière a été évaluée par tamisage à sec. Le **Tableau II.7** rassemble les pesées des refus partiels et cumulés, ainsi que les pourcentages des tamisât associés aux gravillons de classe granulaire 8/16.

Tableau II.9: Analyse granulométrique de Gravier (8/16)

Tamis (mm)	Poids des Tamis vide(g)	Poids des Tamis+ Gravier (g)	Refus du Gravier (g)	Refus Cumulés(g)	Refus Cumulés%	Tamisant Cumulés%
16	0.592	0.607	0.015	0.015	1	99
12.5	0.587	0.799	0.192	0.207	13.8	86.2
10	0.586	1.212	0.625	0.832	55.46	44.74
8	0.652	1.200	0.548	1.380	92	8
6.3	0.641	0.749	0.108	1.488	99.2	0.8
fond	0.451	0.463	0.012	1.500	100	0

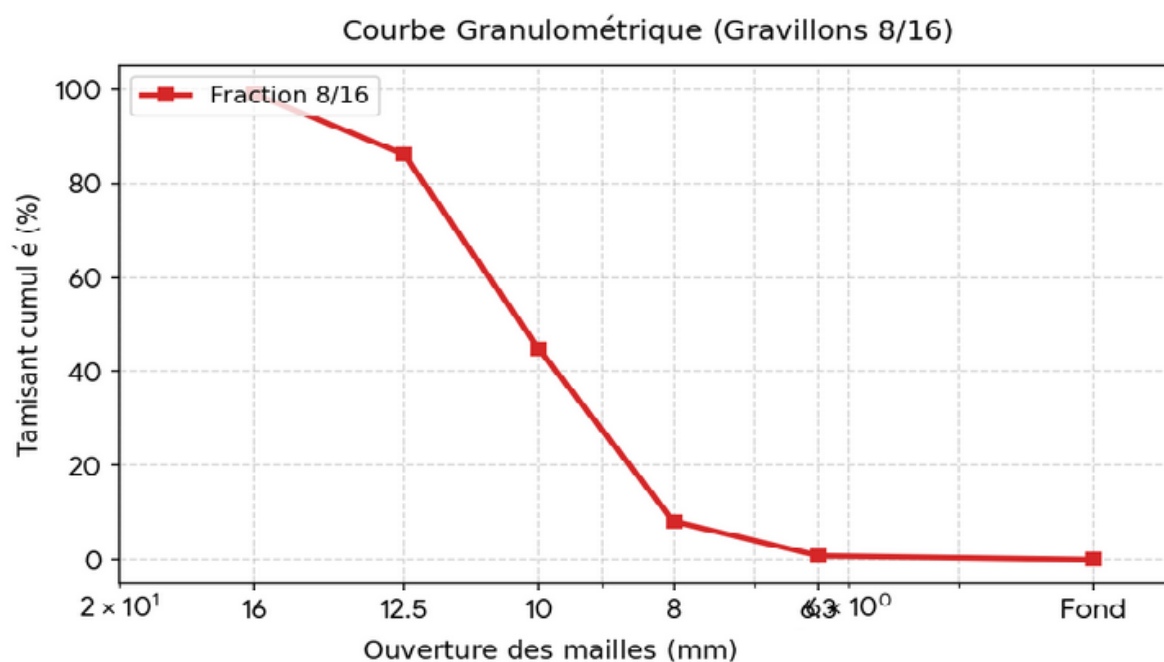


Figure II.11 : Courbe granulométrique des gravillons (fraction 8/16)

II.3.6 : Déchets de brique :

Dans le but d'évaluer les propriétés physiques des granulats recyclés issus de débris de briques, des essais de pesée et de déplacement de volume ont été menés en laboratoire. Les **Tableaux II.10 à II.14** regroupent les mesures expérimentales ainsi que les moyennes calculées pour les masses volumiques absolues et apparentes de la brique concassée, déclinée sous ses deux formes : la fraction de gravillons (3/8) et la fraction fine (sable).

Tableau II.11 : Masse volumique apparente du brique (3/8)

N° d'essai	M1 (g)	V (cm3)	ρ (g/cm ³)	ρ app Moy(g/cm ³)
1	0.843	0.9	0.936	0.9365
2	0.842	0.9	0.935	
3	0.845	0.9	0.938	
4	0.844	0.9	0.937	

Tableau II.12 : Masse volumique absolue du brique (Sable)

N° d'essai	M(g)	V0 (ml)	V1 (ml)	ρ abs (g/cm ³)	ρ abs Moy(g/cm ³)
1	100	130	174	2.2972	2.284
2	120	130	182	2.307	
3	170	130	204	2.297	
4	190	130	214	2.261	

Tableau II.13 : Masse volumique apparente du brique (Sable)

N° d'essai	M1 (g)	V (cm3)	ρ (g/cm ³)	ρ app Moy(g/cm ³)
1	1.033	0.9	1.147	1.148
2	1.039	0.9	1.154	
3	1.034	0.9	1.148	
4	1.032	0.9	1.146	

Les **Tableaux II.14** et **II.15** présentent l'analyse granulométrique du sable et des gravillons 3/8 issus du broyage de débris de briques. Le sable affiche une distribution continue avec une quantité importante de fines (17.54% sous 0.16mm). La fraction grossière 3/8 est quant à elle très resserrée, se concentrant principalement entre les mailles de 5 et 6.3mm (52.6% de refus cumulés). L'association de ces deux fuseaux granulométriques complémentaires permettra d'optimiser la compacité du micro-béton recyclé.

Tableau II.14 : Analyse granulométrique de brique (sable)

Tamis (mm)	Poids des Tamis vide(g)	Poids des Tamis + Brique (g)	Refus du Brique (g)	Refus Cumulés (g)	Refus Cumulés%	Tamisant Cumulés%
3.15	0.604	0.609	0.005	0.005	0.33	99.67
2.5	0.596	0.684	0.088	0.093	6.2	93.8
1.25	0.505	0.959	0.464	0.557	37.13	62.87
0.63	0.499	0.776	0.277	0.834	55.6	44.4
0.315	0.462	0.698	0.236	1.070	71.33	28.67
0.16	0.274	0.441	0.167	1.237	82.46	17.54
fond	0.451	0.714	0.263	1500	100	0

Tableau II.15 : Analyse granulométrique de brique (3/8)

Tamis (mm)	Poids des Tamis vide(g)	Poids des Tamis+Brique(g)	Refus du Brique(g)	Refus Cumulés(g)	Refus Cumulés%	Tamisant Cumulés%
10	0.586	0.586	0	0	0	0
8	0.645	0.649	0.004	0.004	0.26	99.74
6.3	0.641	1.170	0.529	0.533	35.53	64.47
5	0.627	0.884	0.257	0.790	52.66	47.34
4	0.602	0.067	0.465	1.255	83.66	16.34
3.16	0.607	0.750	0.143	1.398	93.2	6.8
fond	0.453	0.555	0.102	1.500	100	0

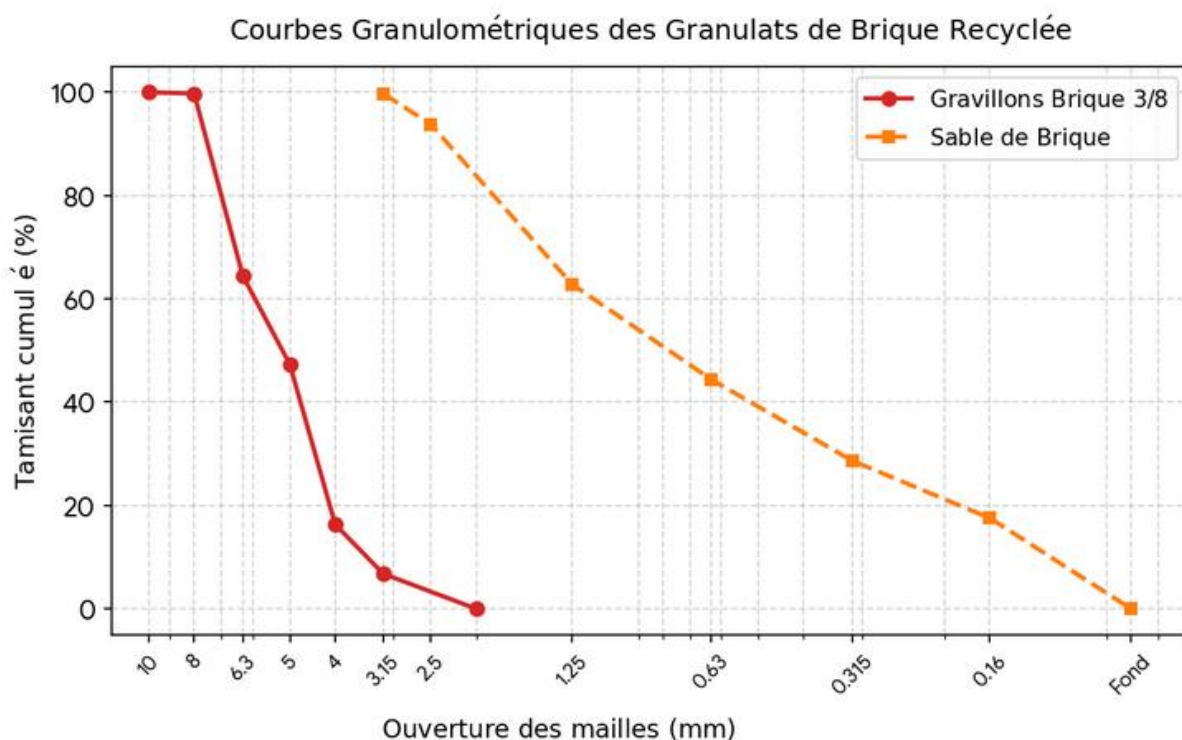


Figure II.12 : Courbes granulométriques comparées du sable et des gravillons 3/8 de brique

Calcul du Module de Finesse (Mf) de sable de brique

Selon la norme NF EN 933-1, le module de finesse correspond à la somme des refus cumulés exprimés en pourcentage sur une série de tamis spécifiés, divisée par 100. En reprenant les données de votre **Tableau II.14** :

$$Mf = \frac{0.33 + 6.20 + 37.13 + 55.60 + 71.33 + 82.46}{100} = \frac{253.05}{100} = 2.53$$

Le calcul effectué à partir des refus cumulés de l'analyse granulométrique (**Tableau II.14**) donne un **module de finesse (Mf) de 2.53** pour le sable de brique recyclée. Cette valeur, idéalement comprise dans l'intervalle réglementaire [2.2, 2.8], classe ce sédiment parmi les sables de granularité moyenne. Ce résultat garantit une ouvrabilité satisfaisante pour le micro-béton tout en favorisant de bonnes résistances mécaniques grâce à un dosage en éléments fins équilibré, limitant ainsi les risques de ségrégation lors de la mise en œuvre

Conclusion du Chapitre II

En conclusion, la caractérisation des constituants confirme la conformité des matières premières pour la formulation du micro-béton selon la méthode de Scramtaiev. Le ciment CEM II/B-L 42.5N et l'adjuvant Sikaplast® BV 40+ assurent une base liante stable. Côté granulats, le mélange optimal de gravillons naturels est fixé à 40 % de fraction 3/8 et 60 % de fraction 8/16 (essai N°7) pour maximiser la compacité. Les sables possèdent des granularités idéales, avec des modules de finesse de 2,61 pour le sable de dune et de 2,53 pour le sable de brique recyclée, ce dernier compensant sa richesse en fines par une distribution continue. Ces propriétés physiques validées permettent d'aborder l'étude des quatre formulations expérimentales (0 %, 5 %, 10 % et 15 % de substitution) dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III:

RESULTATS ET INTERPRETATION

III.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus sur les différents mélanges de micro-béton élaborés avec des taux de substitution variables en déchets de brique. L'objectif principal est d'évaluer l'influence de ces sous-produits sur les propriétés physiques et mécaniques du matériau, notamment sa résistance à la compression, sa résistance à la flexion, son absorption d'eau et sa porosité. Les résultats sont présentés sous forme de graphiques et de tableaux, puis font l'objet d'une interprétation détaillée afin de mettre en évidence le comportement du micro-béton.

III.2. Formulation des Béton :

Dans ce travail, nous avons étudié les caractéristiques mécaniques de huit formulations de béton, définies comme suit :

- **Formulation 01 (Témoin 1) :** Béton témoin sans ajout ni adjuvant.
- **Formulation 02 :** Béton avec 5 % de sable de brique de récupération.
- **Formulation 03 :** Béton avec 10 % de sable de brique de récupération.
- **Formulation 04 :** Béton avec 15 % de sable de brique de récupération.
- **Formulation 05 (Témoin 2) :** Béton témoin sans déchet ni adjuvant.
- **Formulation 06 :** Béton avec 5 % de gravillons de brique (3/8) et 5 % de sable de brique.
- **Formulation 07 :** Béton avec 10 % de gravillons de brique (3/8) et 5 % de sable de brique.
- **Formulation 08 :** Béton avec 15 % de gravillons de brique (3/8).

III.3. Les compositions :

Les différentes formulations de micro-béton ont été élaborées en substituant partiellement les granulats naturels par des déchets de brique, afin d'évaluer leur impact sur les propriétés physiques et mécaniques du matériau.

L'étude s'articule autour de deux axes principaux :

- **Première phase :** Le sable naturel a été remplacé par du sable de brique à des taux de substitution de 5 %, 10 % et 15 %.

- **Seconde phase :** Les gravillons (3/8) ont été partiellement substitués par des débris de brique de même granularité (3/8), avec l'incorporation de sable de brique pour certaines compositions.

Afin de garantir la comparabilité des essais, les dosages en ciment et en graviers (8/16) ont été maintenus constants pour l'ensemble des mélanges. Seules les proportions des matériaux de substitution ont été ajustées selon la formulation ciblée. Par ailleurs, le rapport eau/ciment (E/C) et le dosage en adjuvant ont été adaptés pour assurer une ouvrabilité optimale et une parfaite homogénéité des mélanges.

Enfin, les éprouvettes confectionnées ont été conservées par immersion dans l'eau à température ambiante jusqu'aux échéances de 7, 14 et 28 jours requises pour les essais expérimentaux.

Partie 1 : Substitution du sable naturel par du sable de brique de récupération

Le tableau III.1 détaille la composition massique exacte de chaque gâchée, mettant notamment en relief l'ajustement progressif de la quantité d'eau de gâchage (rapport E/C) indispensable au maintien d'une ouvrabilité constante, en raison de la forte capacité d'absorption d'eau des particules de brique.

Tableau III.1 : Composition massique des différentes formulations de micro-béton (Série 1)

Échantillons	Sable (g)	G3/8 (g)	G8/16 (g)	Ciment (g)	Brique (g)	E/C	Adjuvant %
Témoin B01	6000	4800	7200	4500	0	0.386	1.5
B02 (5%)	5700	4800	7200	4500	300	0.411	1.5
B03 (10%)	5400	4800	7200	4500	600	0.56	1.5
B04 (15%)	5100	4800	7200	4500	900	0.562	1.5

III.1.1 Résistance à la compression :

La résistance à la compression constitue le paramètre fondamental pour caractériser les performances mécaniques et la durabilité du micro-béton. Afin de suivre l'évolution cinétique de cette propriété au cours du durcissement, les essais de rupture par écrasement ont été réalisés à différentes échéances, à savoir 7, 14 et 28 jours de cure par immersion.

Tableau III.2 : Évolution de la résistance à la compression des mélanges de micro-béton en fonction de la durée de cure par immersion

Type de béton	Résistance à la compression (MPa)		
	7j	14j	28j
Témoins B01	64.23	62.97	62.97
B02	49.54	53.22	53.22
B03	38.17	41,52	41,52
B04	39.88	42.96	42.96

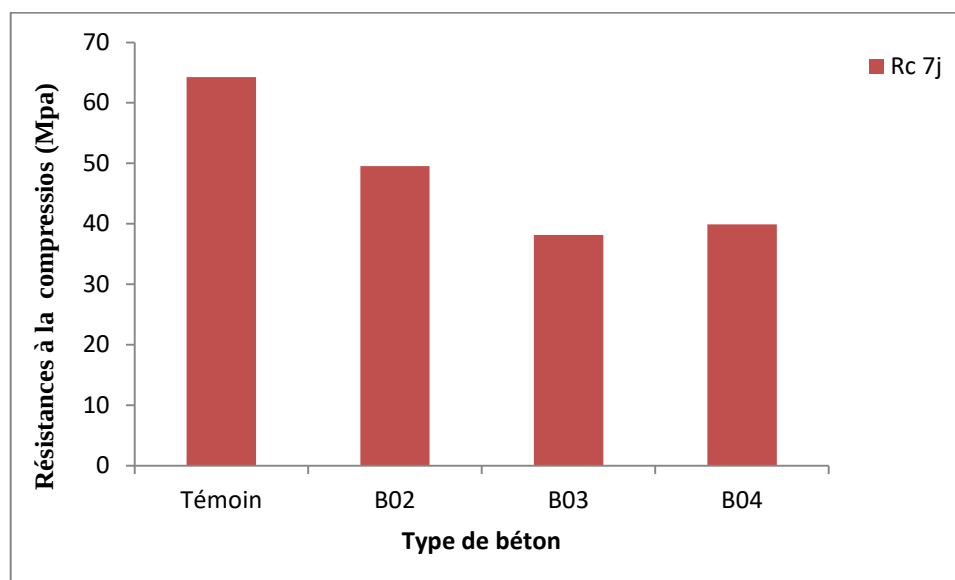


Figure III.1: Résistance à la compression des différentes formulations de micro-béton à 7 jours

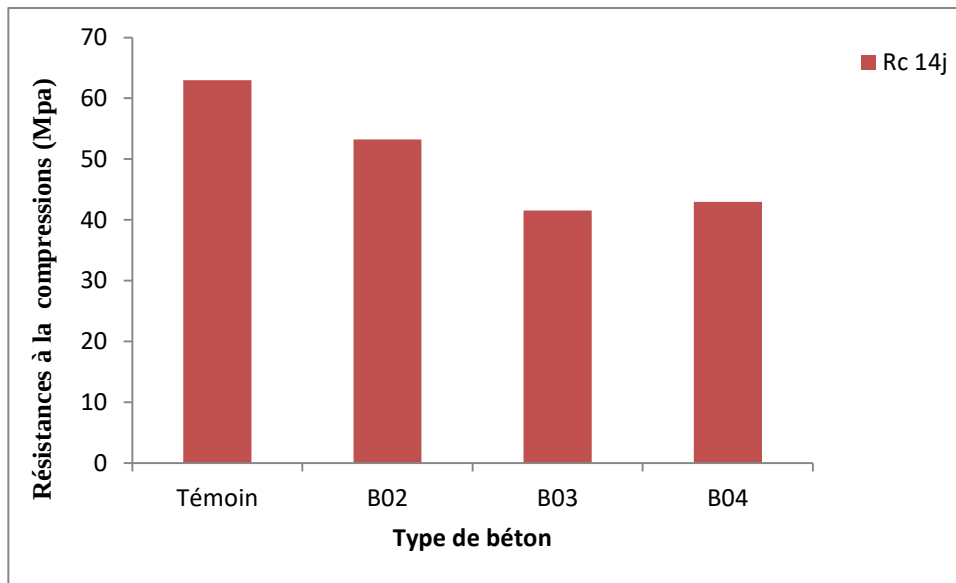


Figure III.2: Résistance à la compression des différentes formulations de micro-béton à 14jours

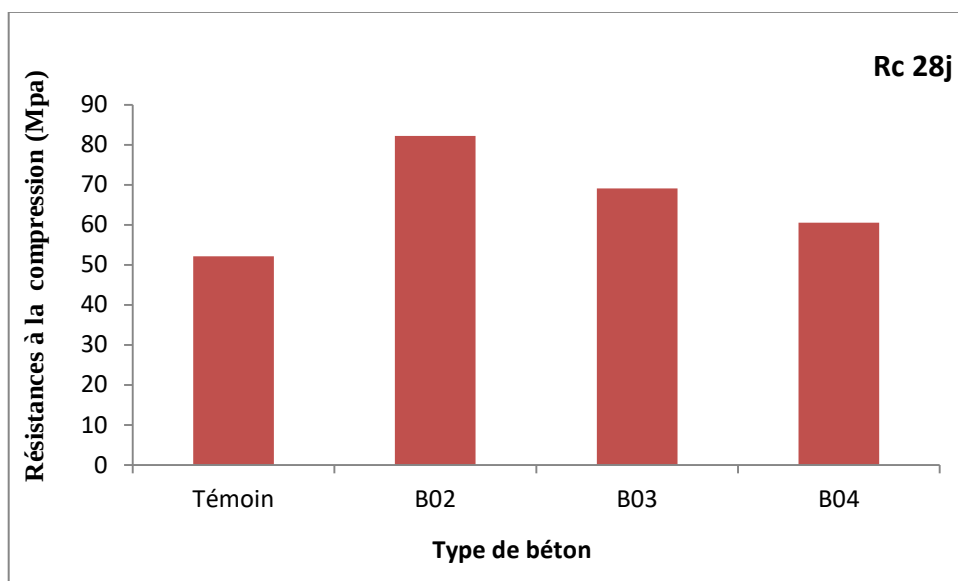


Figure III.3: Résistance à la compression des différentes formulations de micro-béton à 28jours

III.1.2. La masse volumique :

La masse volumique constitue une propriété physique fondamentale pour caractériser la compacité et la densité du micro-béton élaboré. L'objectif de cet essai est d'étudier l'impact de l'incorporation des déchets de brique sur la masse volumique du matériau, afin d'évaluer précisément les variations structurelles induites par les différents taux de substitution. Cette analyse permet notamment de mettre en corrélation l'évolution de la porosité interne du micro-béton avec ses performances mécaniques globales.

$$\rho = \frac{m}{v}$$

- m : la masse
- v : volume

Tableau III.3 : Évolution de la masse volumique des différentes formulations de micro-béton (g/cm³)

Type de béton	La masse volumique		
	7j	14j	28j
Témoin	2.408	2.438	2.439
B02	2.307	2.300	2.238
B03	2.275	2.257	2.297
B04	2.30	2.312	2.310

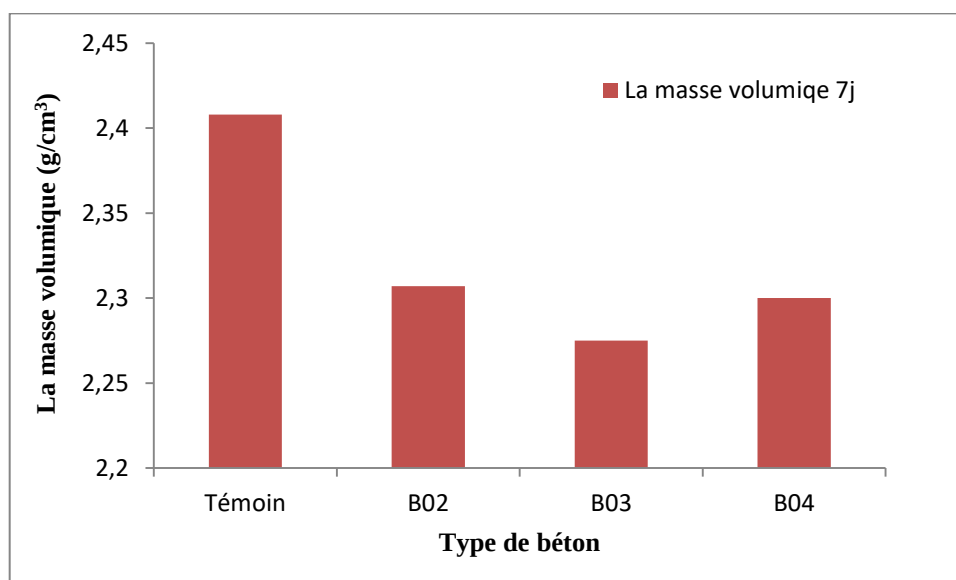


Figure III.4: Évolution de la masse volumique des différentes formulations de micro-béton à 7 jours

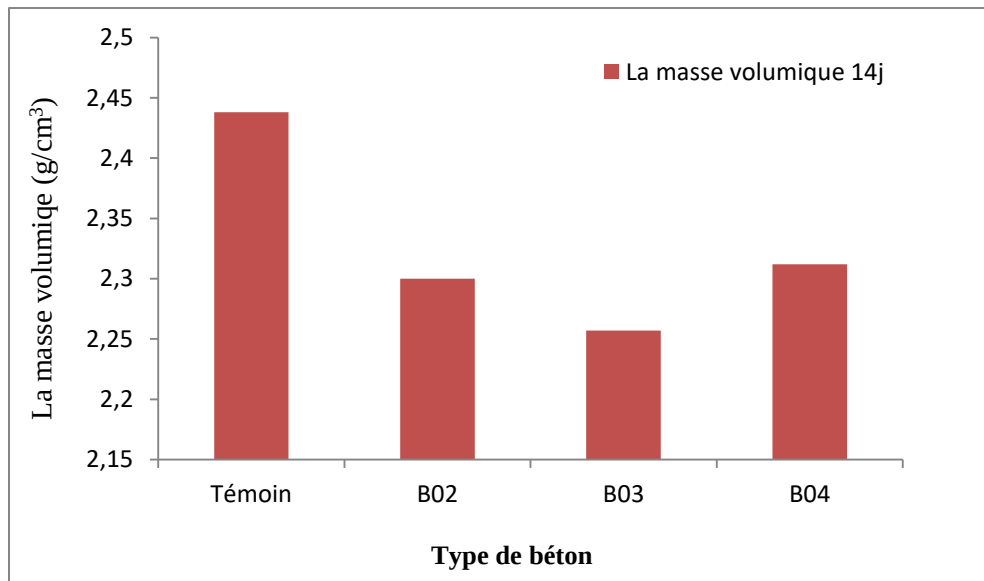


Figure III.5: Évolution de la masse volumique des différentes formulations de micro-béton à 14 jours

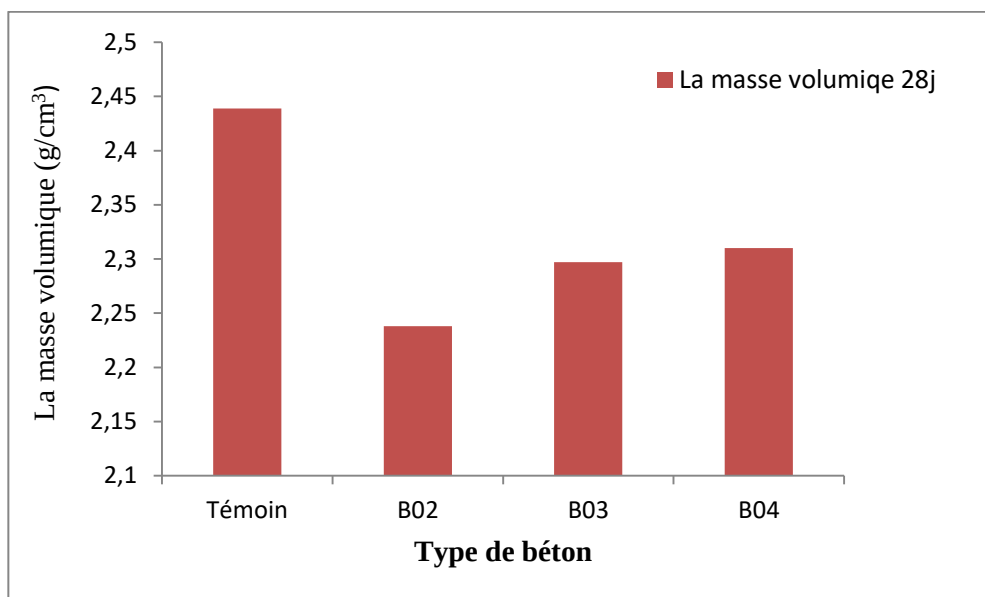


Figure III.6: Évolution de la masse volumique des différentes formulations de micro-béton à 28 jours

III.1.3. Absorption :

L'essai d'absorption a été réalisé afin d'évaluer la capacité du micro-béton à absorber l'eau. Cette propriété est directement liée à la porosité du matériau et permet d'apprécier son comportement vis-à-vis de l'humidité ainsi que sa durabilité. [16] [17]

Les résultats obtenus sont présentés dans les figures sous dessous avec

$$Abs(\%) = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100$$

- Mh : masse humide
- Ms : masse sèche

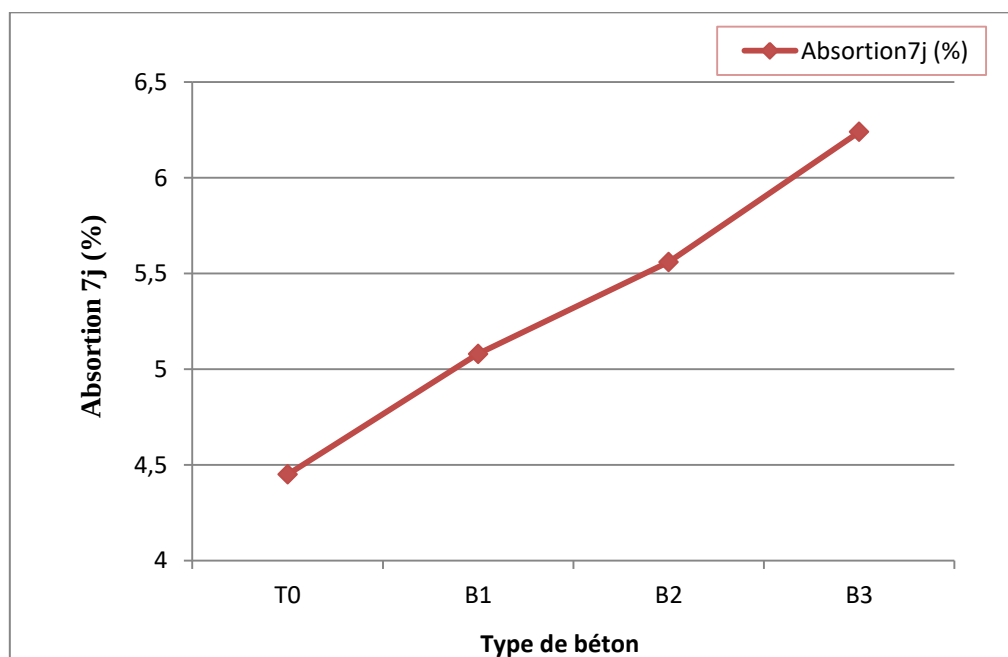


Figure III.7: Évolution du taux d'absorption d'eau des micro-bétons à l'âge de 7 jours

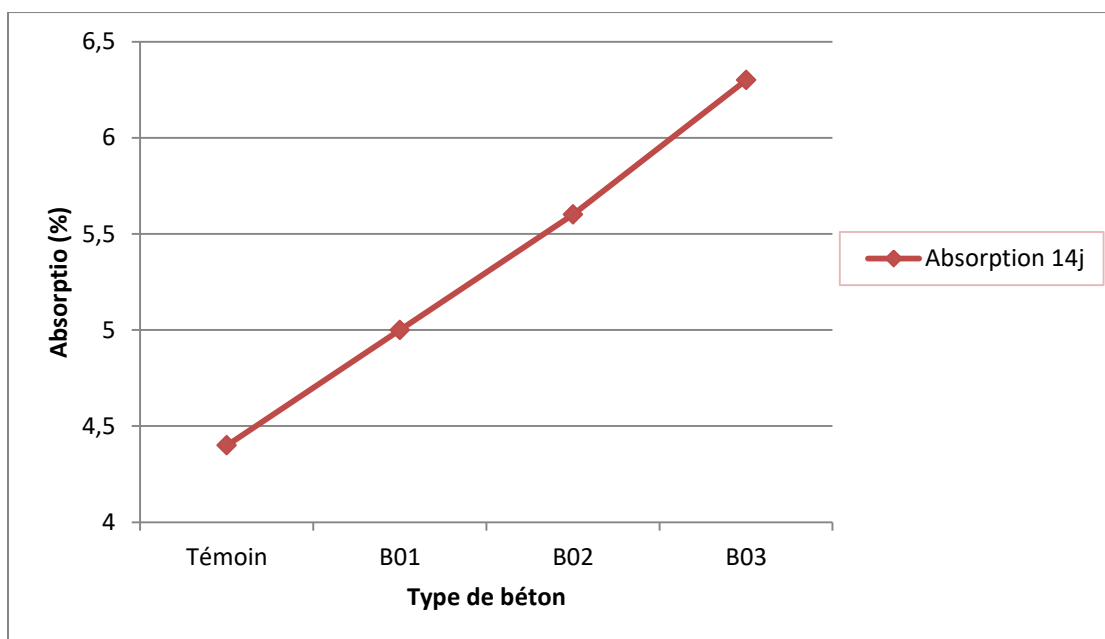


Figure III.8: Évolution du taux d'absorption d'eau des micro-bétons à l'âge de 14 jours

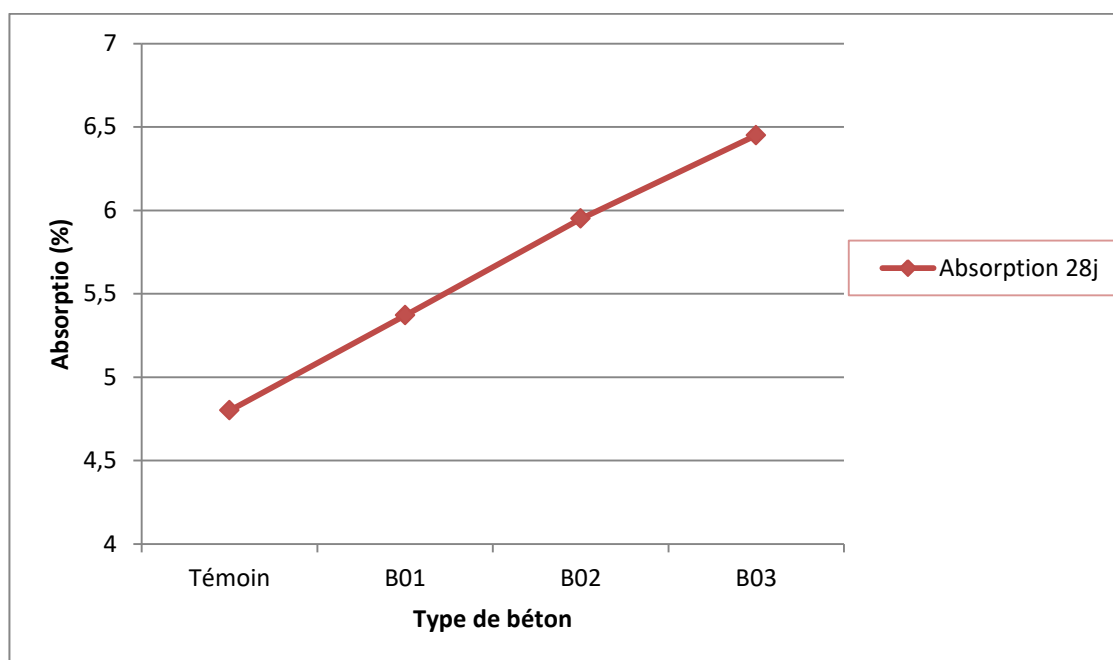


Figure III.9: Évolution du taux d'absorption d'eau des micro-bétons à l'âge de 28 jours

Partie 2 : Substitution combinée des gravillons (3/8) et du sable naturel par des débris de brique

- **La résistance à la compression**

Cette seconde phase expérimentale est consacrée à l'étude des performances du micro-béton soumis à une substitution plus complexe des granulats naturels. L'objectif est d'analyser l'effet combiné du remplacement partiel ou total des gravillons fins (G 3/8) par des débris de brique de même granularité (3/8), associé ou non à l'incorporation de sable de brique de récupération. Cette approche permet d'évaluer la faisabilité technique d'un béton à plus forte teneur en matériaux recyclés. Afin d'isoler rigoureusement l'impact de ces substitutions sur la microstructure, les dosages initiaux en ciment et en gros graviers (G 8/16) ont été maintenus strictement identiques à la formulation témoin. Les proportions des différents sédiments recyclés ont été ajustées pour chaque mélange, tout en adaptant le rapport eau/ciment (E/C) et le dosage de l'adjuvant afin de préserver une ouvrabilité optimale et une parfaite homogénéité du matériau frais.

Tableau III.4 : Composition massique des différentes formulations de micro-béton (Série 2)

Type de béton	Sable (g)	G3/8 (g)	G8/16 (g)	Ciment (g)	Brique 3/8 (g)	Sable de brique	E/C	Adjuvant %
témoin	6000	4800	7200	4500	0	0	0.58	0
B06	5700	4560	7200	4500	240	300	0.35	1.5
B07	5700	4320	7200	4500	480	300	0.46	1.5
B08	6000	4080	7200	4500	720	0	0.46	1.5

Tableau III.5 : Évolution de la résistance à la compression de la seconde série de micro-bétons en fonction de la durée de cure par immersion

Type de béton	Résistance à la compression (MPa)		
	7j	14j	28j
Témoin	47.26	52.14	58.67
B06	76.23	76.70	82.18
B07	67.40	69 .11	73.00
B08	58.67	60.52	62.65

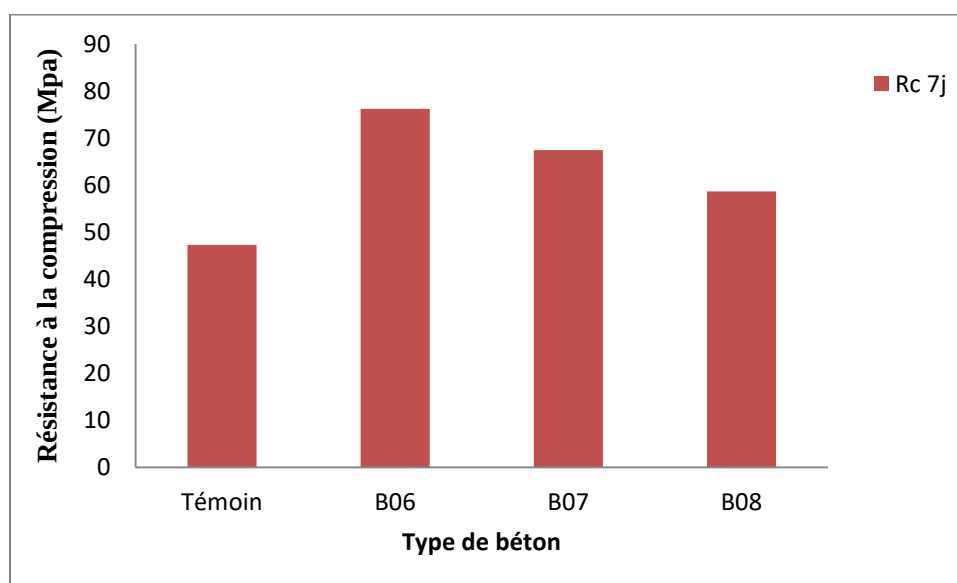


Figure III.10: Évolution de la résistance à la compression des formulations de la seconde série à l'âge de 7 jours

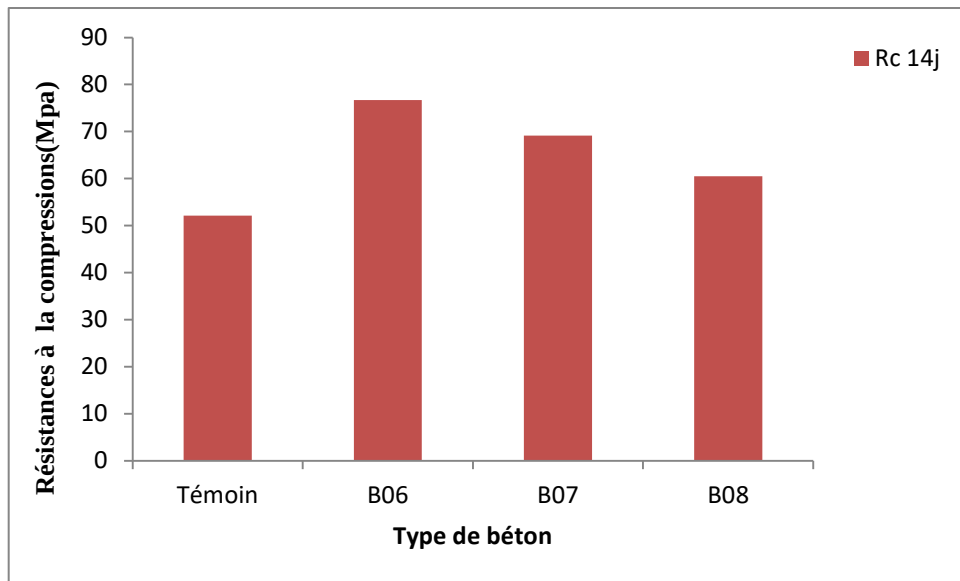


Figure III.11 : Évolution de la résistance à la compression des formulations de la seconde série à l'âge de 14 jours

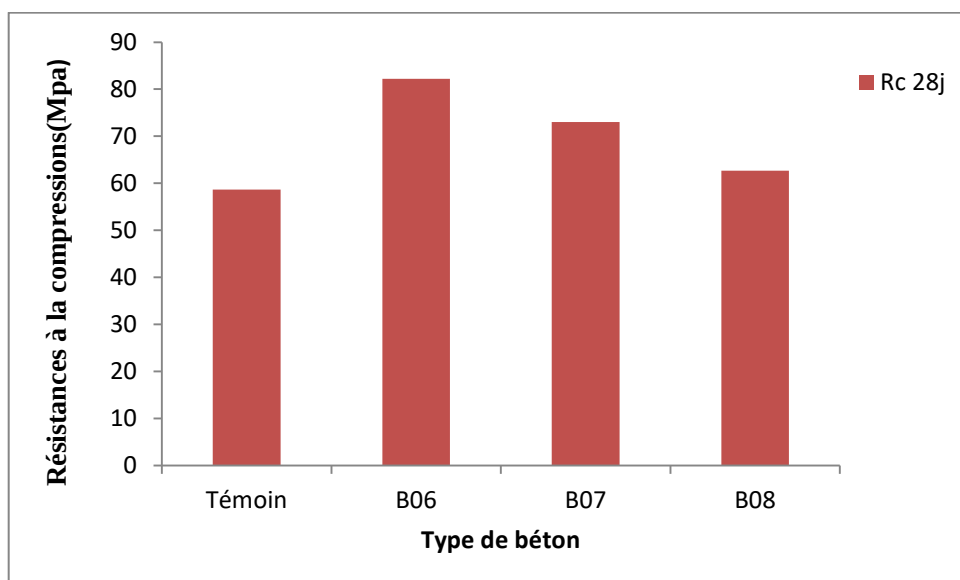


Figure III.12: Évolution de la résistance à la compression des formulations de la seconde série à l'âge de 28 jours

- **La masse volumique**

Les résultats de la masse volumique des différentes formulations de micro-béton de la seconde série, mesurés aux échéances de 7, 14 et 28 jours, sont rassemblés dans le **Tableau III.6**. La détermination de ce paramètre physique à l'état durci permet d'analyser l'impact de la substitution combinée des gravillons (3/8) et du sable naturel par les débris de brique recyclée sur la compacité globale de la matrice. L'évolution de ces valeurs au cours du temps sert également d'indicateur pour évaluer les modifications de la porosité interne induites par les différents taux de remplacement des granulats

Tableau III.6 : Évolution de la masse volumique des formulations de la seconde série (g/cm³)

Type de béton	La masse volumique		
	7j	14j	28j
Témoin	2.392	2.334	2.348
B06	2. 360	2.418	2.291
B07	2.296	2.471	2.301
B08	2.340	2.298	2.288

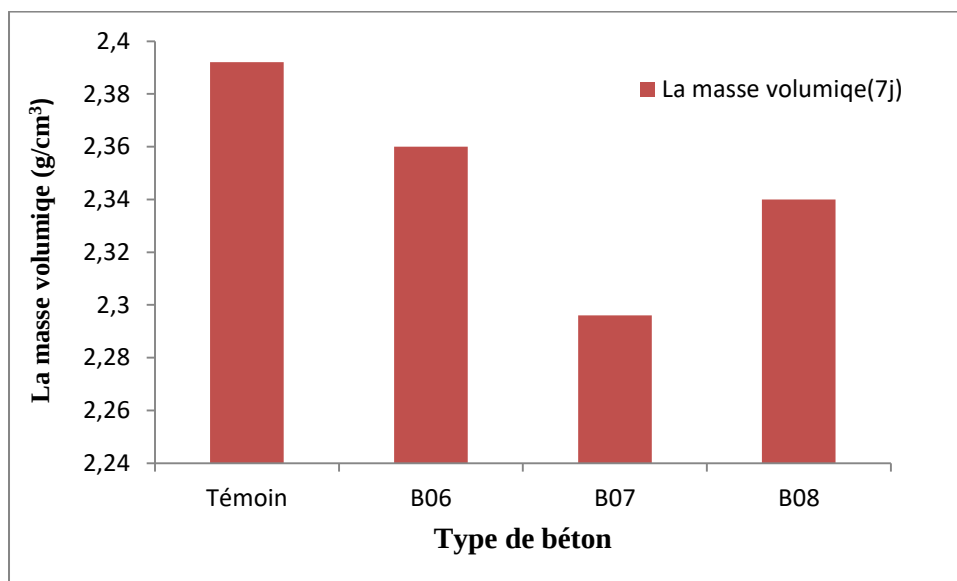


Figure III.13: Masse volumique des différentes formulations de micro-béton à l'âge de 7 jours

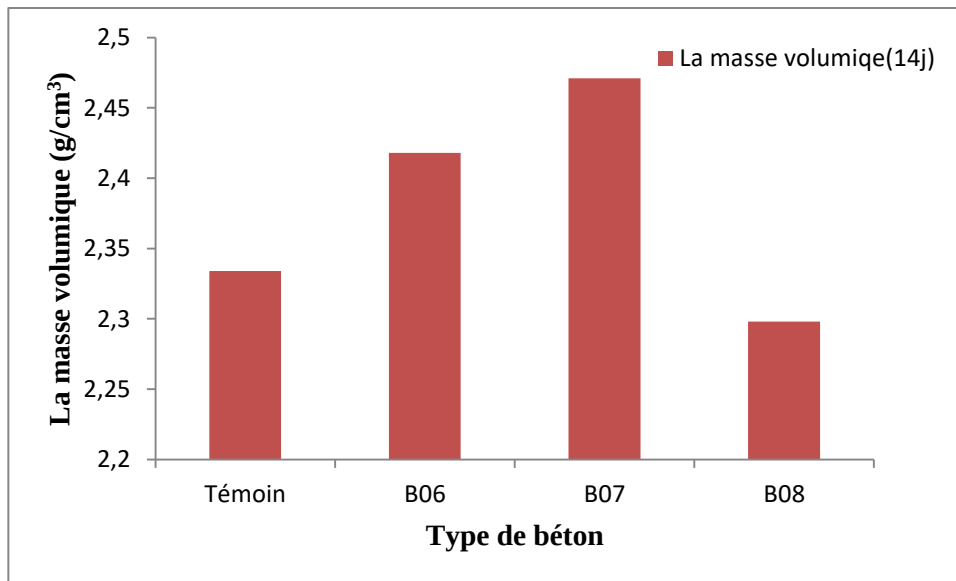


Figure III.14: Masse volumique des différentes formulations de micro-béton à l'âge de 14 jours

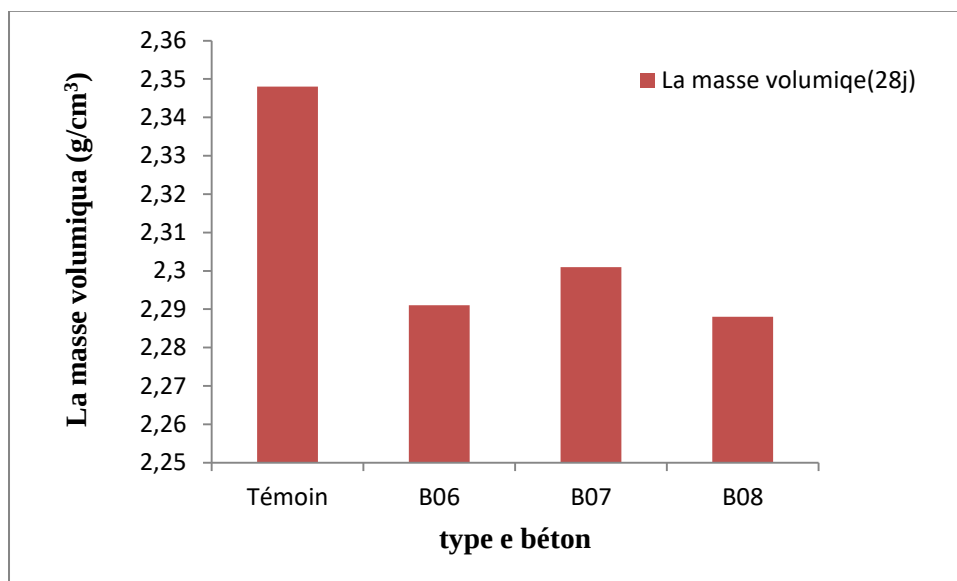


Figure III.15: Masse volumique des différentes formulations de micro-béton à l'âge de 28 jours

• Absorption

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau des différentes formulations de micro-béton sont rassemblés dans le **Figure III.16**. Ces valeurs permettent de mesurer directement l'impact des granulats de brique recyclés sur la porosité ouverte et la perméabilité du matériau durci.

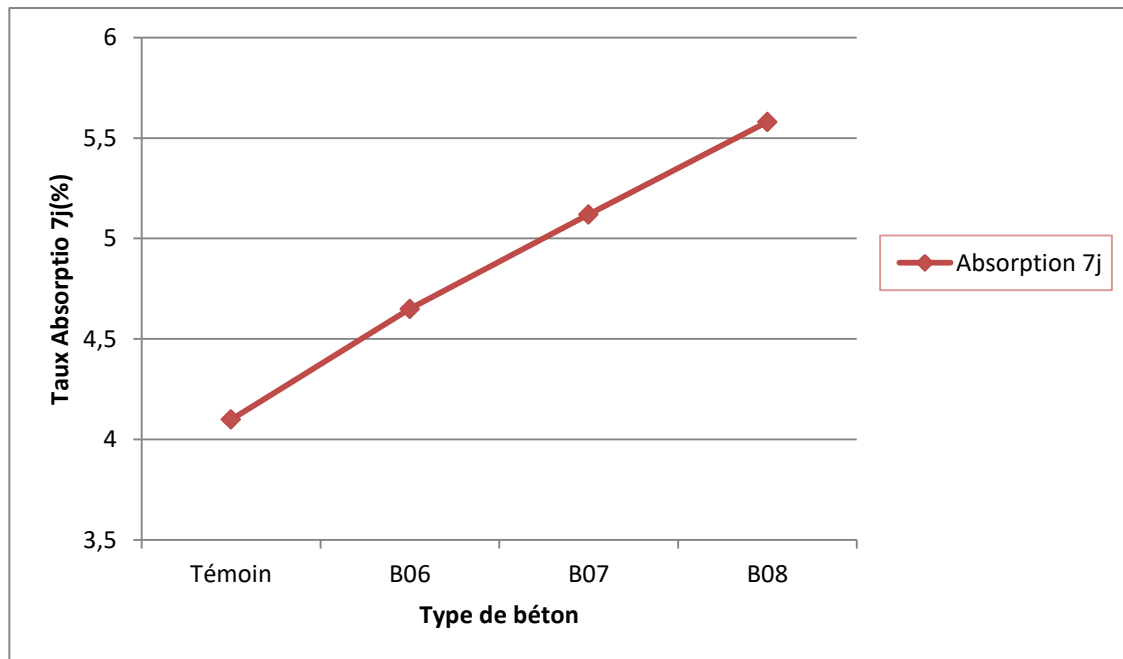


Figure III.16: Absorption capillaire des différentes formulations de micro-béton à l'âge de 7j

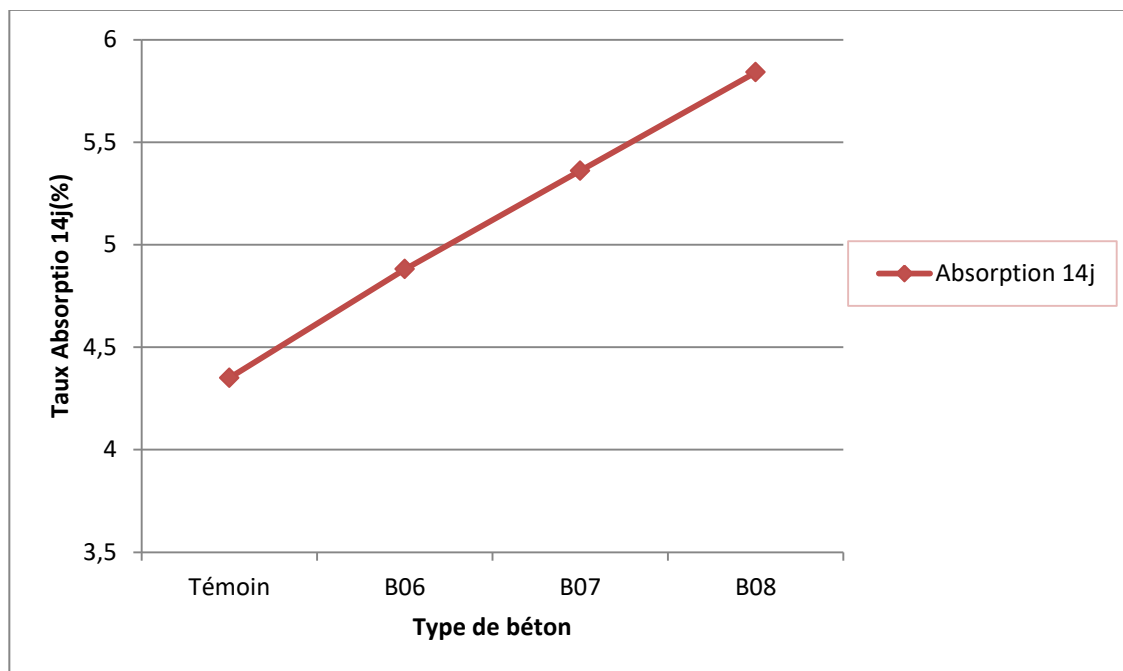


Figure III.17: Absorption capillaire des différentes formulations de micro-béton à l'âge de 14j

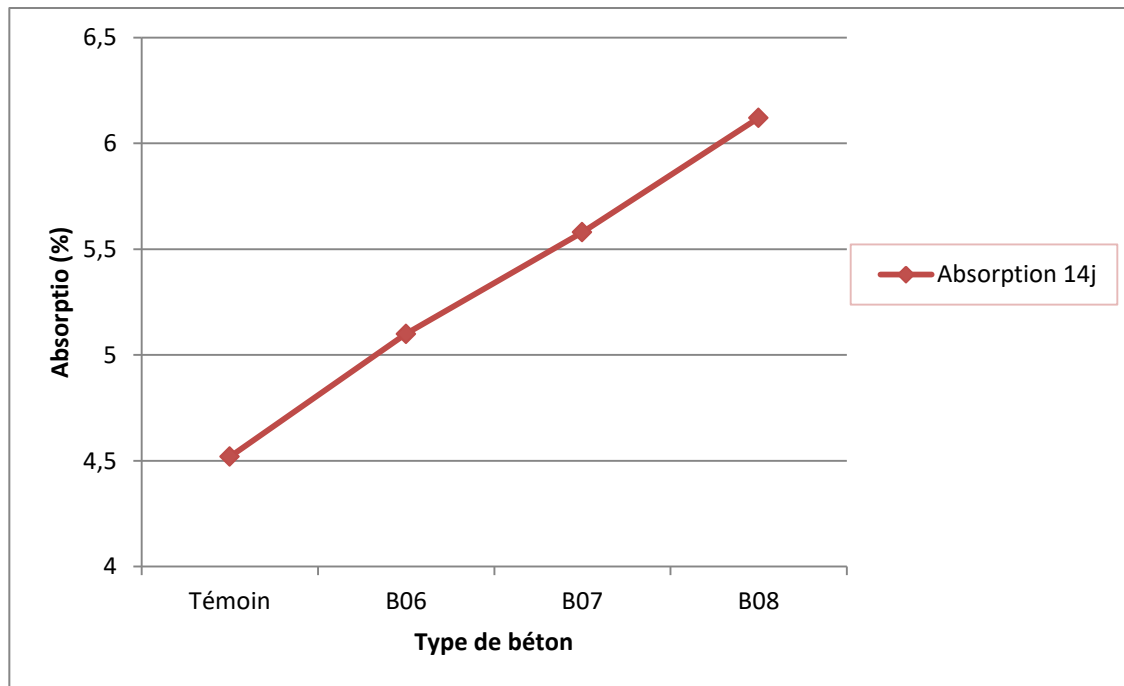


Figure III.18: Absorption capillaire des différentes formulations de micro-béton à l'âge de 28j

Interprétation des résultats de la résistance à la compression

1. Interprétation pour la Première Série (Série 1 : Sable de brique)

L'analyse des résultats de la première série montre que l'incorporation de sable de brique diminue globalement la résistance à la compression du micro-béton. À l'âge de 28 jours, la résistance chute de **62,97 MPa** pour le témoin (B01) à **41,52 MPa** pour le mélange à 10 % de brique (B03), ce qui représente une baisse importante de **34,06 %**. Cette diminution s'explique par la fragilité des grains de brique recyclée par rapport au sable de quartz naturel, ainsi que par l'augmentation du rapport eau/ciment (E/C) ; l'évaporation de cet excès d'eau crée des vides (porosité) qui affaiblissent la structure. Néanmoins, pour le mélange à 15 % (B04), la résistance remonte légèrement à **42,96 MPa** (soit une baisse atténuée à **31,78 %** par rapport au témoin). Ce léger sursaut est dû à l'effet filler des poussières fines de brique qui remplissent les trous microscopiques, associé à une réaction pouzzolanique tardive entre la brique cuite et le ciment. Enfin, la cinétique indique que cette série acquiert presque toute sa force dès 14 jours avant de stagner jusqu'à 28 jours.

2. Interprétation pour la Seconde Série (Série 2 : Gravillons et Sable de brique)

L'analyse des résultats de la seconde série montre, à l'inverse de la première phase, une amélioration spectaculaire de la résistance à la compression pour toutes les formulations intégrant les déchets de brique. À l'échéance de 28 jours, le passage du béton témoin (58,67 MPa) à la formulation B06 (5 % de gravillons et 5 % de sable de brique) se traduit par une hausse majeure de **40,07 %** de la résistance, atteignant une valeur maximale de **82,18 MPa**. Pour la formulation B07 (10 % de gravillons et 5 % de sable de brique), la performance progresse également de **24,42 %** par rapport au témoin pour s'établir à **73,00 MPa**. Enfin, même pour le mélange B08 contenant 15 % de gravillons de brique seuls, la résistance augmente de **6,78 %** pour atteindre **62,65...**

Cette hausse remarquable s'explique par la rugosité de la brique concassée qui offre une bien meilleure adhérence mécanique avec la pâte de ciment. De plus, l'action combinée du sable de brique et des débris fins dans les mélanges B06 et B07 apporte un effet filler optimal qui densifie fortement la matrice, ce qui explique pourquoi ils dépassent nettement la formulation B08. Concernant la cinétique, cette seconde série affiche une évolution continue et normale des performances de 7 jours jusqu'à 28 jours.

Interprétation de la masse volumique

1. Interprétation de la masse volumique (Série 1 : Sable de brique)

L'analyse des résultats expérimentaux indique que l'incorporation de sable de brique modifie de façon notable la masse volumique du micro-béton au cours de sa cure. Par rapport au témoin, qui atteint une densité maximale de **2,439 g/cm³** à 28 jours, les formulations B02 et B03 affichent une baisse de masse volumique de respectivement **8,24 %** (2,238 g/cm³) et **5,82 %** (2,297 g/cm³). Cette diminution est directement liée à la nature poreuse et à la faible densité intrinsèque des grains de brique recyclée par rapport au sable de quartz naturel. En revanche, la formulation B04 (15 % de sable de brique) montre une remontée de sa masse volumique à **2,310 g/cm³** à 28 jours. Ce gain de densité valide l'effet filler des poussières ultra-fines de brique qui viennent combler les vides microscopiques du mélange. Enfin, la cinétique montre une stabilisation globale de la structure interne entre 14 et 28 jours pour l'ensemble des échantillons.

2. Analyse des formulations de la seconde série (Série 2 : Gravillons 3/8 et Sable de brique)

Le tableau de formulation de la seconde série met en évidence l'impact de la substitution combinée des gravillons (G 3/8) et du sable sur les paramètres de gâchage. Contrairement à la première série, l'introduction des déchets de brique s'accompagne ici d'une réduction drastique du rapport eau/ciment (E/C), qui chute de **39,65 %** pour le mélange B06 (E/C de 0,35) et de **20,69 %** pour B07 et B08 (E/C de 0,46) par rapport au témoin (E/C de 0,58). Cette diminution de l'eau de gâchage est rendue possible par l'introduction de **1,5 % d'adjuvant** plastifiant, absent dans le témoin. L'effet de cet adjuvant compense largement la forte absorption d'eau naturelle des granulats de brique. Cette réduction de l'eau libre dans la matrice cimentaire naissante permet d'anticiper une forte compacité à l'état durci, expliquant ainsi les excellentes performances à la compression obtenues pour les mélanges B06 et B07.

Interprétation de l'absorption capillaire

1. Interprétation de l'absorption capillaire (Série 1 : Sable de brique)

L'analyse comparative des résultats aux échéances de 7, 14 et 28 jours met en évidence deux phénomènes fondamentaux régissant le comportement des bétons étudiés. D'une part, quel que soit l'âge de l'essai, la hiérarchie entre les formulations reste inchangée : le béton témoin T0 affiche systématiquement la plus faible absorption d'eau, tandis que le taux croît de manière quasi linéaire en passant par B1 et B2 pour culminer chez le béton B3. Cette tendance constante confirme que les modifications de formulation introduites de B1 à B3 induisent une augmentation permanente de la porosité ouverte et du réseau capillaire interconnecté au sein de la matrice. D'autre part, l'examen temporel révèle une hausse progressive et systématique des taux d'absorption globale pour une même formulation au fil des échéances (par exemple, le béton T0 passe de 4,45 % à 7 jours, à 4,37 % à 14 jours puis à 4,85 % à 28 jours, tandis que B3 progresse de 6,25 % à 6,44 %). Cette augmentation de la masse d'eau absorbée au cours du temps traduit la cinétique de saturation lente de la matrice cimentaire : l'eau pénètre d'abord les macropores à 7 jours, puis s'infiltre progressivement par capillarité fine dans les pores les plus denses et profonds à 28 jours. En conclusion, bien que l'hydratation du ciment se poursuive dans le temps pour densifier la structure, l'impact de la modification de la

formulation (de T0 vers B3) reste le facteur prédominant sur l'augmentation de la perméabilité et de la sensibilité du matériau à la pénétration des fluides.

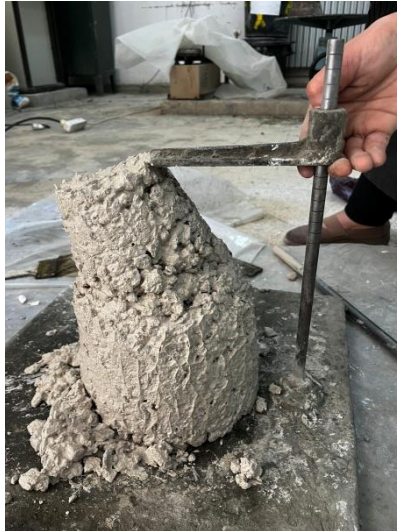
2. Interprétation pour la Seconde Série (Série 2 : Gravillons et Sable de brique)

L'analyse des résultats expérimentaux à 28 jours met en évidence une relation linéaire croissante entre la formulation des matériaux et leur taux d'absorption d'eau. Le **Béton témoin** présente la plus faible capacité d'absorption avec **4,51 %**, ce qui démontre une matrice cimentaire plus étanche, dense et compacte à long terme. À l'inverse, l'évolution vers les formulations modifiées engendre une augmentation régulière et significative de la porosité ouverte : le taux s'élève à **5,11 %** pour le béton **B6**, atteint **5,58 %** pour le **B7**, et culmine à **6,11 %** pour le béton **B8**. Cette progression systématique prouve que les modifications apportées aux mélanges (de la variante B6 à B8) développent un réseau de pores capillaires plus volumineux ou plus interconnectés. Par conséquent, le Béton témoin offre la meilleure résistance à la pénétration des fluides à 28 jours, tandis que le béton B8 s'avère être le plus perméable et le plus vulnérable aux transferts hydriques à long terme

Conclusion

L'utilisation de déchets de brique de récupération comme substituts granulaires s'avère techniquement fiable pour l'élaboration de micro-bétons. Si la substitution exclusive du sable fin dégrade les propriétés de résistance, la substitution combinée et optimisée des gravillons fins (Série 2, notamment la formule B06) démontre qu'il est possible de concilier valorisation écologique des sous-produits et hautes performances mécaniques, ouvrant la voie à une valorisation durable de ces matériaux de déconstruction dans le secteur du bâtiment.

Annexe : Photos des essais



CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce projet de fin d'études s'inscrit dans une démarche doublement vertueuse : répondre aux exigences de la transition écologique en valorisant les déchets issus de la déconstruction et optimiser les propriétés des matériaux cimentaires par l'élaboration d'un micro-béton durable. L'objectif principal était d'évaluer rigoureusement l'impact de la substitution partielle des granulats naturels (sable et gravillons 3/8) par des débris de brique de récupération à différentes échéances (7, 14 et 28 jours).

Les investigations expérimentales menées à travers deux approches distinctes permettent de tirer les conclusions majeures suivantes :

* Sur le plan physique et hydrique (Porosité et Masse volumique) : L'introduction de la brique broyée provoque un allègement structurel systématique du micro-béton, se traduisant par une baisse de la masse volumique (jusqu'à environ $2,24 \text{ g/cm}^3$). En raison de la porosité intrinsèque et du caractère fortement hydrophile des particules de brique, les taux d'absorption d'eau augmentent de façon linéaire avec le taux de substitution, atteignant leur maximum à 28 jours (6,44 % pour la série 1 et 6,11 % pour la série 2). L'analyse temporelle met en lumière une cinétique de saturation lente, où l'eau migre progressivement des macropores vers les réseaux capillaires les plus fins de la matrice cimentaire.

* Sur le plan mécanique de la Série 1 (Substitution du sable) : Le remplacement exclusif du sable naturel par du sable de brique induit une chute de la résistance à la compression à 28 jours, passant de 62,97 MPa (Témoin) à 41,52 MPa pour un taux de 10 %. Cette baisse est directement corrélée à l'élévation nécessaire du rapport eau/ciment (E/C) visant à compenser la forte absorption de la brique pour maintenir l'ouvrabilité, ce qui crée des vides structuraux après hydratation.

* Sur le plan mécanique de la Série 2 (Substitution combinée des gravillons et du sable) : Cette phase révèle le potentiel remarquable de la valorisation de ces déchets. La formulation B06 (combinant 5 % de gravillons de brique et 5 % de sable de brique) a permis d'atteindre une résistance à la compression exceptionnelle de 82,18 MPa à 28 jours, surclassant

largement son béton témoin (58,67 MPa). Ce gain s'explique par une excellente compacité du squelette granulaire et par une réduction drastique du rapport E/C à 0,35 rendue possible par l'ajustement précis de l'adjuvant, favorisant une zone de transition interfaciale très dense entre la pâte de ciment et les granulats recyclés.

En somme, ce travail démontre la faisabilité technique de la formulation de micro-bétons éco-efficaces à base de briques recyclées. S'il convient de limiter les taux de substitution du sable pour éviter des chutes de résistance trop importantes, l'optimisation des gravillons fins ouvre des perspectives majeures. Elle prouve qu'il est tout à fait possible d'allier préservation des ressources naturelles, réduction de l'empreinte carbone du secteur de la construction et obtention de performances mécaniques de très haut niveau.

Perspectives futures :

1. Étudier le comportement à long terme (au-delà de 28 jours, à 90 jours) pour analyser l'effet pouzzolanique potentiel de la fine de brique.
2. Évaluer la durabilité de ces bétons face aux cycles de gel-dégel ou aux agressions chimiques (milieux sulfatique), compte tenu de leur absorption d'eau plus élevée.

Références bibliographiques :

- [1] Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th Edition). Pearson Education Limited, England.
- [2] Dreux, G., & Festa, J. (1998). *Nouveau Guide du Béton et de ses Constituants*. Éditions Eyrolles, Paris, France.
- [3] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties and Materials* (4th Edition). McGraw-Hill Education, New York, USA.
- [4] Taylor, H. F. W. (1997). *Cement Chemistry* (2nd Edition). Thomas Telford Publishing, London, UK.
- [5] Neville, A., & Brooks, J. (2010). *Concrete Technology* (2nd Edition). Pearson Education Limited, England.
- [6] NF EN 1340. (2004). *Éléments pour bordures de trottoir en béton – Prescriptions et méthodes d’essai*. AFNOR, France.
- [7] Layada, S., Khelaifia, K. «Etude et caractérisation d'un béton à base de recyclâts - Etat de l'Art» Mémoire Master, université 8 Mai 1945 - Guelma, 2020.
- [8] Djablahi, E.K. & Dehimene, C. «Effet des températures élevées sur les mortiers renforcés de fibre métallique contenant les déchets de brique» Mémoire Master, université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2022.
- [9] NF P18-301. (1990). *Granulats – Détermination de la masse volumique absolue*. AFNOR, France.
- [10] NF P18-554. (1990). *Granulats – Détermination de la masse volumique apparente*. AFNOR, France.
- [11] NF EN 933-1. (2012). *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 1 : Détermination de la granularité*. AFNOR, France.
- [12] EN 197-1. (2011). *Ciment – Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants*. Comité Européen de Normalisation, Bruxelles.
- [13] NA 442. (2000). *Norme Algérienne relative aux ciments courants*. IANOR, Algérie.
- [14] NF EN 206. (2014). *Béton – Spécification, performances, production et conformité*. AFNOR, France.
- [15] Moriconi, G. (2009). “Recycling of Rubble from Building Demolition for Low-Shrinkage Concretes.” *Waste Management*, Vol. 29, No. 2, pp. 785–789.
- [16] ASTM C127. (2015). *Standard Test Method for Relative Density and Absorption of Coarse Aggregate*. ASTM International, USA.

[17] ASTM C128. (2015). Standard Test Method for Relative Density and Absorption of Fine Aggregate. ASTM International, USA.

[18] Pacheco-Torgal, F., Tam, V. W. Y., Labrincha, J. A., Ding, Y., & de Brito, J. (2013). Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste. Woodhead Publishing, Cambridge, UK.

[19] Debieb, F., & Kenai, S. (2008). “The Use of Coarse and Fine Crushed Bricks as Aggregate in Concrete.” Construction and Building Materials, Vol. 22, No. 5, pp. 886–893.