



**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued**

**Faculté de la Technologie**

**Département de génie civile**

**MÉMOIRE**

**Présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER ACADEMIQUE**

**Spécialité : Matériaux en Génie civil**

**Présenté par :**

1. Bouafia Djouheyna
2. Maamra Ikram

**Intitulé :**

**Optimisation des performances mécaniques et de durabilité des  
ciments par substitution de déchets :**

**Une approche par plan de mélange et analyse statistique**

**Soutenue le : 29/05 /2025**

**Devant le jury composé de :**

**Dr : Labiode el Bachir**

**Président**

**Dr : Frik Ali**

**Examineur**

**Dr : MASMOUDI Fouzi**

**Encadreur**

**Année académique : 2024/2025**

Bismillah  
بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ  
Bismillahir Rahmanir Rahim

## Dédicace

---

### Dédicace

*À celui qui a toujours été mon pilier, ma sécurité et ma sérénité...  
À mon cher père, qui ne m'a jamais laissée manquer de rien, qui m'a soutenue à  
chaque étape de ma vie, et en particulier dans ce mémoire... Merci du fond du  
cœur, ta présence est une bénédiction inestimable.*

*À ma chère mère, battement de mon cœur, source de mon bonheur et de  
ma force, celle qui a toujours été ma voie vers le paradis, et qui m'a  
accompagnée avec amour dans chaque moment de ma vie... Merci pour ton  
amour, ta patience et tes prières silencieuses qui ont éclairé mon chemin.*

*À mes frères et sœurs bien-aimés*

*Je vous aime tous. Merci pour votre présence et votre soutien  
inconditionnel.*

*À mes précieuses amies, qui m'ont accompagnée avec sincérité et  
affection tout au long de ce parcours... Merci pour votre chaleur et votre belle  
compagnie.*

*À une personne très chère à mon cœur, qui a été une grande source de  
force et de soutien dans cette étape... Merci infiniment.*

*Et à tous ceux qui m'ont soutenue par une prière avant même l'action...*

*Que Dieu vous récompense et vous bénisse.*

***Bouafia Djouheyna***

## Dédicace

---

### Dédicace

*À celle qui a semé en moi les graines du bien, et qui m'a arrosée de sa tendresse  
jusqu'à ce que je devienne forte...*

*À ma chère mère, source d'amour, secret de ma réussite, et incarnation de  
toutes les belles valeurs.*

*À mon noble père, mon soutien et mon repère, celui qui m'a appris que la  
persévérance fait des miracles.*

*À mon grand-père, que Dieu ait son âme, parti en corps mais dont les prières et  
la noble mémoire continuent d'éclairer mon chemin.*

*À ma précieuse grand-mère, qui a toujours été pour moi un second cœur, une  
autre mère irremplaçable.*

*À vous tous, je dédie le fruit de ce modeste travail, en témoignage de ma  
reconnaissance, mon estime et ma profonde gratitude.*

***Maamra Ikram***

## Remerciement

---

### Remerciement

*Tout d'abord, nous remercions profondément Dieu Tout-Puissant de nous avoir accordé la force, la patience, le courage et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant, **Dr. Fouzi Masmoudi**, pour le temps qu'il nous a consacré, ainsi que pour les outils méthodologiques et scientifiques essentiels qu'il nous a transmis tout au long de cette recherche. Grâce à son expertise, il a su nous orienter et nous conseiller avec bienveillance.*

*Nos remerciements s'adressent également au **Dr. Mohamed**, responsable du laboratoire, pour son aide précieuse, son accueil chaleureux et les conditions favorables qu'il nous a offertes pour réaliser nos essais.*

*Nous remercions aussi tous les enseignants qui nous ont enrichis, même par une petite information, et qui ont contribué à notre formation scientifique et personnelle durant notre parcours universitaire.*

*Nous exprimons aussi notre sincère reconnaissance aux membres du jury, pour avoir accepté d'évaluer et de discuter notre mémoire, et pour l'attention qu'ils ont portée à notre travail.*

*Enfin, nous adressons notre profonde gratitude à toutes les personnes qui nous ont soutenues par un mot encourageant ou une prière sincère. Que Dieu vous bénisse tous.*

***Et notre dernière prière est : Louange à Dieu, Seigneur des mondes.**  
(Et notre dernière invocation est : Alhamdoulillah Rabbi Al-'Alamin.)*

# Résumé

---

## Résumé

Ce projet se concentre sur l'étude et le développement un mortier en incorporant des fillers de poudre de marbre de poudre de céramique, et de poudre de brique rouge. L'objectif est de formuler un mortier en substituant 20% du ciment par ces fillers, en utilisant la méthode du plan de mélange pour optimiser les compositions. Cette approche permet de déterminer les proportions idéales de chaque filler pour obtenir des performances maximales. Les performances des mélanges sont évaluées sur plusieurs critères : résistance à la compression, résistance à la flexion, absorption par immersion, absorption par capillarité.

Les résultats montrent que l'intégration de ces fillers peut significativement améliorer certaines propriétés des mortiers, comme l'absorption, tout en réduisant l'empreinte carbone liée à la production de ciment. Les tests de résistance à la compression réalisés à 7, 28 et 60 jours ont révélé des valeurs comprises entre 15,41 MPa et 25,53 MPa, démontrant une résistance mécanique par fois insignifiante. De plus, l'absorption d'eau par immersion a été de l'ordre de 8,5% et la capillarité est de l'ordre de 13%, indiquant une durabilité insuffisante des mortiers.

Mots-clés : mortiers, fillers, poudre de marbre, poudre de céramique, poudre de brique rouge, méthode du plan de mélange.

# Résumé

---

## Abstract

This project focuses on the study and development of a mortar incorporating marble powder, ceramic powder, and red brick powder fillers. The objective is to formulate a mortar by substituting these fillers for 20% of the cement, using the mix design method to optimize the compositions. This approach allows determining the ideal proportions of each filler to achieve maximum performance. The performance of the mixes is evaluated based on several criteria: compressive strength, flexural strength, immersion absorption, and capillary absorption. The results show that the integration of these fillers can significantly improve certain mortar properties, such as absorption, while reducing the carbon footprint associated with cement production. Compressive strength tests conducted at 7, 28, and 60 days revealed values ranging from 15.41 MPa to 25.53 MPa, demonstrating insignificant mechanical strength at times. Furthermore, water absorption by immersion was around 8.5% and capillarity was around 13%, indicating insufficient durability of the mortars.

**Keywords:** mortars, fillers, marble powder, ceramic powder, red brick powder, mixing plane method.

## الملخص

### ملخص

يركز هذا المشروع على دراسة وتطوير ملاط يحتوي على حشوات من مسحوق الرخام ومسحوق السيراميك ومسحوق الطوب الأحمر. الهدف هو صياغة ملاط عن طريق استبدال 20% من الأسمنت بهذه الحشوات، باستخدام طريقة خطة الخلط لتحسين التركيبات. يتيح هذا النهج تحديد النسب المثالية لكل مادة مألوفة للحصول على أقصى قدر من الأداء. يتم تقييم أداء الخلطات على عدة معايير: قوة الضغط، قوة الانحناء، الامتصاص بالغمر، الامتصاص بالشعرية.

وتظهر النتائج أن دمج هذه الحشوات يمكن أن يحسن بشكل كبير بعض خصائص الملاط، مثل الامتصاص، مع تقليل البصمة الكربونية المرتبطة بإنتاج الأسمنت. أظهرت اختبارات قوة الضغط التي أجريت في الأيام 7 و 28 و 60 قيمًا تتراوح بين 15.41 ميغا باسكال و 25.53 ميغا باسكال، مما يدل على مقاومة ميكانيكية كانت غير مهمة في بعض الأحيان. علاوة على ذلك، كان امتصاص الماء عن طريق الغمر في حدود 8.5% وكانت الشعيرات الدموية في حدود 13%، مما يشير إلى عدم كفاية متانة الملاط.

### الكلمات المفتاحية:

ملاط، مواد مألوفة، مسحوق الرخام، مسحوق السيراميك، مسحوق الطوب الأحمر، طريقة مخطط الخلط

# Table de matière

Remerciement.....	III
Résumé.....	IV
Abstract.....	V
الملخص.....	VI
matière de Table .....	VI
figures des Liste .....	VII
tableaux des Liste .....	IX
eset d symboles des Listes .....	XI
abréviations .....	XI
Introduction générale.....	VII
Chapitre I.....	VIII
État de l'Art.....	VIII
I.1. : Introduction.....	9
.I.2 : Définition de mortier .....	9
.I.3 : Différents types des mortiers .....	10
.I.3.1 : Les mortiers de ciment.....	10
.I.3.2 : Les mortiers de chaux.....	10
.I.3.3 : Les mortiers bâtards .....	10
.I.3.4 Mortier réfractaireè: .....	10
.I.3.5 : Mortier rapide.....	10
.I.3.6 Mortier industriel .....	10
.I.4 : Emplois des mortiers .....	11
.I.4.1 : Le hourdage de maçonnerie .....	11
.I.4.2 : Les enduits .....	11
.3.I.4 : Les chapes .....	12
.I.4.4 : les scellement et les calages.....	12
I.5. :rôles d'utilisation de mortier Les. ....	12
.I.6 : Composition du mortier.....	13
.I.6.1 : Le Liant.....	13
.I.6.1.1 : le ciment.....	13
.I.6.1.2 : entLes constituants du cim.....	13
.I.6.1.3 : classification de ciment.....	15
.I.6.2 : Le sable .....	17

.I.6.2.1	: Classification des sables.....	17
.6.3.I	: L'eau de gâchage .....	18
.I.7	: Les ajouts minéraux .....	18
.I.7.1	: Classification des ajouts18	
.I.7.1.1	: Les déchets de briques et de tuiles.....	19
.I.7.1.2	: études ont été menées sur l'utilisation Des.....	25
.I.7.2	: Action des additions minérales.....	29
.I.7.3	: granulats Effet granulaire et durabilité des .....	29
.I.8	: L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil .....	29
.I.8.1	: Avantages économiques .....	30
.I.8.2	: Avantages écologiques .....	30
: I.8.3.	Avantages techniques .....	30
.I.9	: Effets des ajouts sur les matériaux cimentaires .....	31
.I.9.1	: Amélioration de l'ouvrabilité .....	31
.I.9.2	: Durabilité.....	31
.I.9.3	: Développement des résistances .....	32
.I.9.4	: Le développement des mortiers à haute résistance .....	32
Conclusion	.....	33
Chapitre II Matériaux et procédure.....		34
.II.1	:Introduction.....	35
.II.2	:Matériaux utilisés : Propriétés et caractérisation .....	35
.II.2.1	:Le ciment .....	35
.II.2.2	: iaux d'additionsMatér .....	36
.II.2.2.1	: Déchets de marbre.....	36
.II.2.2.2	: Déchets de brique.....	37
.II.2.2.3	Déchets de céramique.....	38
.II.2.3	: Sable.....	38
.II.2.3.1	:Essai de l'équivalent de sable:.....	42
.II.2.4	: Eau de gâchage.....	44
.II.3	: Matériels utilisés .....	44
II.3.1.	: Moules .....	44
.II.4	: Formulation du mortier.....	45
.II.5	: Malaxage du mortier .....	46
.II.6	: Préparation des éprouvettes.....	47

.II.6.1 : Moulage des éprouvettes .....	47
.II.7 : ier à l'état durciLes essais réalisés sur le mort.....	48
.II.7.1 : Résistance à la compression .....	48
.II.7.2 : (Résistance à la flexion (trois points.....	49
II.8. : Essai sur la durabilité.....	50
.II.8.1 :Essai d'absorption par immersion .....	50
.II.8.2 : Essai d'absorption capillaire.....	51
Conclusion .....	52
Chapitre III.....	54
Résultats et discussion.....	54
.III.3Introduction .....	55
.III.2 Résultats et discussion.....	55
.III.2.1 Résultats de résistance à la compression .....	55
.III.2.2 Résultats de résistance à la flexion .....	56
.III.2.3 Résultats d'essai d'absorption immersion .....	58
.III.2.4 Résultats d'essai d'absorption capillaire.....	60
.III.3 Résultats Modélisation statistique .....	62
Conclusion générale.....	68
Référence.....	70
Annexes .....	74

# Liste des figures

Figure I 1: Mortier en état frais [22].....	9
Figure I 2: pose de mortier de hourdage[3].....	11
Figure I 3 Enduits isolants et enduits de façade[3].....	11
Figure I 4 Les chapes fluides chape ciment[3] .....	12
Figure I 5 : les scellement[3] .....	12
Figure I 6 Poudre de ciment courant .....	13
Figure I 7 : déchets céramiques (Source : ALPA Powder Technologie, s.d.) [24]. .....	19
Figure I 8 : Effet de la teneur en poudre de céramique (WCP : waste cer amic Powder) sur (a) la résistance à la compression, (b) la force d'adhérence [13].....	21
Figure I 9 : Schéma de la fabrication des briques [15].....	22
Figure I 10 : Briques creuses comprimées par voie demi-humide [2].....	23
Figure I 11 : Poudre de brique rouge broyée (source : Chaux Michel Boehm) [25]. .....	23
Figure I 12 : Effet de la température de cuisson de la brique sur (a) la résistance à la compression, (b) l'absorption d'eau [13] .....	24
Figure I 13 : Marbre gris avec surface naturelle non traitée(Source : Pikbest) [26].....	26
Figure I 14 : Effet des matériaux cimentaires sur les temps de début et de fin de prise [13].....	27
Figure I 15 :Influence de substitution du sable et du ciment par 10% de poudre de marbre sur la résistance à la compression [13].....	28
Figure I 16 : Evolution de l'étalement en fonction de la teneur en poudre de marbre [13].....	28
figure II 1 : Déchets de marbre. 36	
figure II 2: Déchets de brique.....	37
figure II 3 : Déchets de céramique. ....	38
figure II 4 : Sable alluviorinaire(SA).....	38
figure II 5 : Tamis d'analyse granulométrique.....	39
figure II 6 Essai de la masse volumique apparente. ....	41
figure II 7 : Essai de La masse volumique absolue. ....	42
figure II 8 : Essai de l'équivalent de sable .....	43
figure II 9 : moule (4 ×4×16).....	44
figure II 10 : Substitution de ciment par des ajouts minéraux.....	45
figure II 11 : Les étapes malaxage du mortier.....	47
Figure II 12 les étapes de Moulage des éprouvettes.....	47
figure II 13 : les étapes de Moulage des éprouvettes.....	47
figure II 14 : Essai résistance à la compression.....	48
figure II 15 : Essai résistance à la flexion.....	49
Figure II 16 Essai d'absorption par immersion.....	50
figure II 17 : Essai d'absorption par immersion.....	50
figure II 18 : Essai d'absorption capillaire. ....	52
figure III 1 : Résultats de résistance à la compression 56	
figure III 2 : Résultats de résistance à la flexion .....	58
figure III 3 :Résultats d'essai d'absorption immersion .....	59
figure III 4 : Résultats d'essai d'absorption capillaire.....	61
figure III 5 : Absorption d'eau capillaire par unité de surface de mortier .....	61
figure III 6 : Actual vs. Predicted Résistance a la compression et la résistance à la flexion a 28 jours	64
figure III 7: INFLEUNCE DES FACTEURS ETUDIER .....	67
figure III 8: iso réponse la résistance à la compression (Rc) et à la résistance à la flexion (Rf) .....	67

# Liste des tableaux

Tableau I 1 : Composition chimique du gypse [2].	15
Tableau I 3 : Différents types de ciment courants en fonction de leur composition[5].	16
tableau II 1 : Analyses chimiques	35
tableau II 2 : Caractéristiques physiques du ciment	36
tableau II 3 : Résistance à la compression	36
tableau II 4 : Caractéristiques physiques de déchets de marbre.	37
tableau II 5 : Caractéristiques physiques de déchets de brique	37
tableau II 6 : Caractéristiques physiques de déchets de céramique.	38
tableau II 7 : Résultats d'analyse granulométrique du sable utilisé.	40
tableau II 8 : résultats de la masse volumique apparent de sable.	41
tableau II 9 : résultats de la masse volumique absolue de sable.	42
tableau II 10 : Préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les mortiers.	43
tableau II 11 : résultat de l'essai de l'équivalent du sable utilisé.	43
tableau II 12 : Proportions des facteurs dans les compositions étudiées.	45
tableau II 14 : Les quantités de chaque mélange.	46
tableau III 1 : résumé de l'ajustement	62
tableau III 2: analyse de l'ANOVA	63
tableau III 3: test de student	66

# Listes des symboles et des abréviations

<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Alumine
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	Carbonate de calcium
<b>CaO</b>	Oxyde de calcium
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	Hydroxyde de calcium (la chaux)
<b>CaSO<sub>4</sub></b>	Sulfate de calcium
<b>CEM</b>	Ciment Portland
<b>CEM II</b>	Ciment portland composé.
<b>CEM III</b>	Ciment de haut fourneau.
<b>CEM IV</b>	Ciment pouzzolanique.
<b>CEM V</b>	Ciment au laitier et aux cendres.
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dioxyde de carbone
<b>C<sub>2</sub>S</b>	Silicate bicalcique (belite)
<b>C-S-H</b>	Silicate de calcium hydraté
<b>PM</b>	Poudre Marbre
<b>PB</b>	Poudre Brique
<b>PC</b>	Poudre Céramique
<b>H</b>	Le coefficient d'homogénéité
<b>C<sub>3</sub>S</b>	Silicate tricalcique (alite)
<b>C<sub>3</sub>A</b>	Aluminate tricalcique
<b>C<sub>4</sub>AF</b>	Aluminate-ferrite tétracalcique
<b>SA</b>	Sable alluviorinnaire
<b>MF</b>	Module de finesse
<b>DM</b>	Déchets marbre
<b>DB</b>	Déchets Brique
<b>DC</b>	Déchets Céramique
<b>E/L</b>	Rapport de l'eau sur Lien

# **Introduction général**

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Avec l'augmentation des préoccupations environnementales liées à la production industrielle, le secteur du ciment est aujourd'hui appelé à évoluer vers des solutions plus durables. La fabrication du clinker, composant principal du ciment, consomme beaucoup d'énergie et génère une quantité importante de CO<sub>2</sub>. Pour limiter cet impact, plusieurs recherches se tournent vers l'utilisation de déchets comme matériaux de substitution.

Dans cette étude, on s'est intéressé à l'utilisation de déchets inertes couramment disponibles, à savoir le marbre, la brique et la céramique. Ces matériaux sont souvent rejetés sans valorisation, alors qu'ils peuvent, après broyage, être intégrés dans la composition du ciment pour remplacer partiellement le clinker.

L'objectif est d'évaluer l'effet de cette substitution sur les propriétés mécaniques et de durabilité du ciment, en se basant sur une approche expérimentale et une analyse statistique des résultats. Plusieurs formulations ont été testées avec des dosages variés de ces déchets, afin de déterminer les combinaisons les plus performantes.

Le travail est organisé en trois chapitres :

**Le premier chapitre** présente des notions générales sur le ciment, le mortier, ainsi qu'une description des déchets utilisés dans ce travail.

**Le deuxième chapitre** décrit les protocoles expérimentaux suivis, les matériaux employés et les conditions de réalisation des essais.

**Le troisième chapitre** regroupe les résultats des essais réalisés : la résistance à la compression, l'absorption par immersion et par capillarité. Une modélisation statistique est également présentée, suivie d'une discussion des résultats et de quelques pistes pour des recherches futures.

# Chapitre I

## État de l'Art

### I.1. Introduction :

Dans le cadre de cette étude, il est essentiel de revenir d'abord aux notions de base qui constituent le ciment et le mortier, afin de mieux comprendre l'impact des matériaux ajoutés dans notre travail. Ce chapitre s'intéresse ainsi à la présentation du mortier : sa définition, ses types, ses utilisations et ses constituants principaux, avec une attention particulière portée au ciment, élément central de notre formulation, car il n'intègre aucune addition à l'état initial. Cela permet de mieux évaluer l'effet réel des déchets utilisés comme ajouts.

Par la suite, une description des composants de base (eau, sable) sera faite, avant de se concentrer sur le cœur de notre étude : les additions minérales. Celles-ci, représentées par des déchets inertes tels que le marbre, le briquetage et le céramique, sont analysées sous l'angle de leur classification, leurs propriétés, et leur influence potentielle sur la maniabilité (ouvrabilité) et la durabilité (durabilité) des mortiers.

Ce chapitre se termine par un aperçu sur l'évolution des formulations modernes des mortiers, notamment avec l'introduction d'ajouts innovants dans une logique de durabilité et de valorisation des déchets.

### I.2. Définition de mortier :

Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction. En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, d'un liant (ciment ou chaux) et d'eau dans des proportions données, différant selon les réalisations et d'adjuvant[2]



Figure I 1: Mortier en état frais [22]

mortier normal c'est un mortier qui contient en volume une partie de liant pour trois parties de sable normal. Avec ces proportions le liant remplit les vides du sable, c'est à dire que  $1\text{m}^3$  de sable plus  $1/3$  de  $\text{m}^3$  de liant ne fournit qu'un  $\text{m}^3$  de mortier.  $1\text{m}^3$  de sable +  $1/3$  liant ( $\text{m}^3$ ) =  $1\text{m}^3$  de mortier[1].

### I.3. Différents types des mortiers :

Les mortiers se partagent en différents types [2]

#### I.3.1. Les mortiers de ciment :

Les mortiers de ciment, très résistants, prennent et durcissent rapidement. De plus un dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables. Les dosages courants sont de l'ordre de 300 à 400 kg de ciment pour  $1\text{m}^3$  de sable.

#### I.3.2. Les mortiers de chaux :

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment, surtout lorsque la chaux est calcique.

#### I.3.3. Les mortiers bâtards :

Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales ; mais on mettra une quantité plus ou moins grande l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

#### I.3.4. Mortier réfractaire :

Il est fabriqué avec du ciment fondu, qui résiste à des températures élevées. Il est utilisé pour la construction des cheminées et barbecues ...

#### I.3.5. Mortier rapide :

Il est fabriqué avec du ciment prompt, il est rapide et résistant pour les scellements.

#### I.3.6. Mortier industriel

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortier, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins:

- Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié.

- Mortiers d'imperméabilisation.
- Mortier d'isolation thermique.
- Mortier de jointoiment.
- Mortier de ragréage.
- Mortier de scellement, mortier pour chapes.
- Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment ...
- Mortier de réparation

#### I.4. Emplois des mortiers :

**I.4.1. Le hourdage de maçonnerie :** La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierre de taille, briques), nécessite leur assemblage avec un mortier qui doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour assurer la transmission des charges et une compacité suffisante pour être étanche [3].



**Figure I 2: pose de mortier de hourdage[3].**

**I.4.2. Les enduits :** Ce domaine d'application constitue l'un des plus vastes débouchés des mortiers. A cote des enduits traditionnels en trois couches, se développent aujourd'hui des enduits monocouches épais, ainsi que des enduits isolants[3].



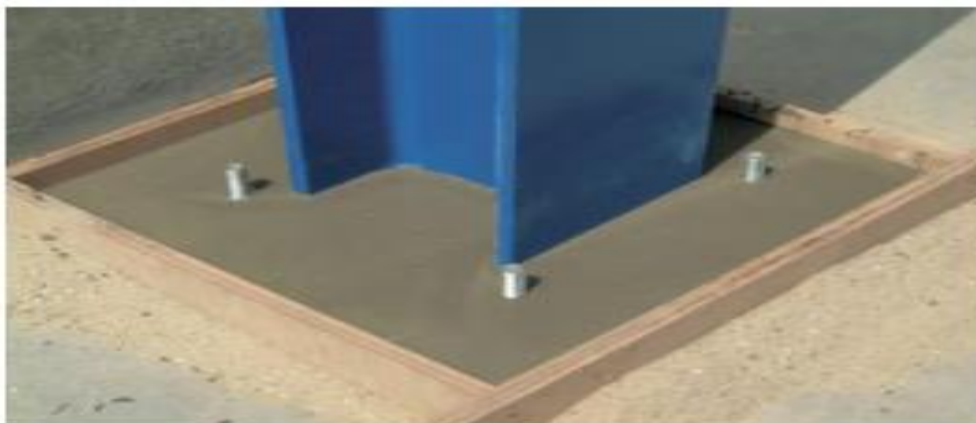
**Figure I 3 Enduits isolants et enduits de façade[3].**

I.4.3. **Les chapes** : Les chapes ont pour fonction d'assurer la mise à niveau du dallage et la régularité de sa surface. Les chapes peuvent constituer la finition. Elles peuvent aussi constituer le support d'un revêtement de sol [3].



**Figure I 4 Les chapes fluides chape ciment[3] .**

I.4.4. **les scellement et les calages** : La multiplicité des problèmes de scellement et de calage a conduit les producteurs de mortiers industriels à mettre au point des produits spécifiques adaptés aux travaux à réaliser : scellements d'éléments de couverture, d'éléments de second œuvre, de mobiliers urbains, de regards de visite [3].



**Figure I 5 : les scellement[3] .**

### **I.5. Les rôles d'utilisation de mortier:**

- Lier les éléments de construction: Former un bloc homogène en assemblant les éléments (briques, pierres, etc.) entre eux.
- Comblers les vides et les fissures: Assurer une surface de contact complète pour éviter les infiltrations d'eau ou d'agents extérieurs.
- Renforcer les propriétés structurelles:
- Améliorer la durabilité du mur et sa résistance aux intempéries (pluie, vent, etc.).

- Protection contre les infiltrations:
- Éviter les fuites d'eau à travers les joints, prolongeant ainsi la durée de vie du bâtiment.
- Garantir la durabilité: Obtenir une construction solide capable de résister aux conditions climatiques sur le long terme. [3]

## I.6. Composition du mortier :

### I.6.1. Le Liant :

On utilise généralement des liants hydrauliques qui peuvent être le ciment, cette dernière est une matière pulvérulente à base de silicate et d'aluminate, et de la chaux obtenue par la cuisson[2].

#### I.6.1.1. le ciment :

Le ciment est une matière inorganique finement broyée qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte capable de faire prise et de durcir. Après durcissement, il conserve sa résistance et sa stabilité, même en milieu humide. C'est un liant hydraulique, c'est-à-dire qu'il durcit grâce à des réactions d'hydratation. Il est obtenu à partir d'un ou de plusieurs constituants soigneusement dosés et transformés[4].



Figure I 6 Poudre de ciment courant

#### I.6.1.2. Les constituants du ciment :

Les ciments sont constitués, par mélange et broyage[2]. Ils se composent de:

##### I.6.1.2.1. Le clinker :

Le clinker est un produit obtenu par cuisson homogénéisée d'un mélange de calcaire et d'argile jusqu'à atteindre une fusion partielle. Il est principalement composé de chaux ( $\text{CaO}$ ), de silice ( $\text{SiO}_2$ ) et d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [5].

Le mélange est en général élaboré à partir de matières premières naturelles extraites de carrière (calcaire, argile, marne, etc.). C'est le clinker qui, après broyage en présence d'une petite quantité de sulfate de chaux (gypse) jouant le rôle de régulateur, permet d'obtenir les ciments Portland [5].

Les éléments simples (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) se combinent pour donner les constituants minéraux suivants :

- Silicate tricalcique (C3S) : 3CaO.SiO<sub>2</sub> (Alite).
- Silicate bicalcique (C2S) : 2CaO.SiO<sub>2</sub> (Bélite).
- Aluminate tricalcique (C3A) : 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
- Ferro aluminate calcique (C4AF) : 4CaO .Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> .Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Célite) [5]

**Tableau I 1 : Propriétés des quatre principaux constituants du ciment portland [7]**

Constituant	Alite	Bélite	Phase aluminate	Célite
<b>Composition chimique</b>	(C3S) 3CaO.SiO <sub>2</sub>	(C2S) 2CaO.SiO <sub>2</sub>	(C3A) 3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(C4AF) 4CaO .Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Prise</b>	Rapide (heures)	Lente (jours)	Instantanée	Très rapide (minutes)
<b>Développement de résistance</b>	Rapide (jours)	Lent (semaines)	Très rapide (un jour)	Très rapide (un jour)
<b>Résistance ultime</b>	Grande (élevée) : Dizaine de MPa	Probablement Grande (élevée) : Dizaine de MPa	Faible : quelques MPa	Faible : quelques MPa
<b>Chaleur d'hydratation</b>	Moyenne : ~500j/g	Faible : ~250j/g	Très élevée : ~850j/g	Moyenne : ~420j/g
<b>Remarques</b>	Le constituant caractérisant du ciment portland		Instable dans l'eau ; vulnérable à l'attaque des sulfates.	caractérisant la couleur grise du ciment

#### I.6.1.2.2. Le gypse :

Le gypse dénommé aussi gypsite est une roche saline commune des bassins sédimentaires soumis à subsidences, elle est composée principalement du minéral gypse, minéral salin très commun des séries sédimentaires, et de sulfate doublement hydraté de

calcium. Ce dernier est à la fois une espèce chimique et une espèce minérale, décrite par la formule  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Le gypse est la roche qui permet de fabriquer industriellement le plâtre [2].

**Tableau I 1 : Composition chimique du gypse [2].**

composant	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$	Cl-
%	10.05	2.99	1.55	26.90	3.86	0.41	0.05	30.33	0.007

#### **I.6.1.2.3. Les additifs :**

Ils sont ajoutés pour améliorer certaines propriétés du ciment sans effets négatifs. Parmi eux : Agents de mouture : sels organiques solubles utilisés en très faibles quantités. Sels solubles : comme certains adjuvants pour mortiers ou bétons.

La proportion d'additifs doit rester très faible, ne dépassant pas 0,5 % de la masse totale, y compris les agents de mouture.

Exception : pour les CEM III/A ou B et CEM III/C, la teneur en NaCl peut aller jusqu'à 1 % [4].

#### **I.6.1.3. classification de ciment :**

Les ciments sont classés en fonction de leur composition en cinq (5) types principaux par les normes NFP-301 et ENV 197-1, (EN 197-1 ; 2000). Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne[5]. La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le tableau suivant :

CEM I : Ciment Portland (CPA)

CEM II : Ciment Portland Composé (CPJ)

CEM III : Ciment de Haut Fourneau (CHF)

CEM IV : Ciment Pouzzolanique (CPZ)

CEM V : Ciment au Laitier et aux Cendres (CLC).[4]

Tableau I 2 : Différents types de ciment courants en fonction de leur composition[5].

Désignations	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants suivants: laitier-pouzzolanes - cendres – calcaires – schistes – fumées de silice	Teneur en constituants secondaires
CEM I	Ciment portland	95 à 100 %		0 à 5 %
CEM II/A	Ciment portland composé	80 à 94 %	De 6 à 20% d'un quelconque des constituants, sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10% (*);	0 à 5 %
CEM II/B		65 à 79 %	De 21 à 35% avec les mêmes restrictions que ci-dessus (*).	0 à 5 %
CEM III/A	Ciment de haut-fourneau	35 à 64 %	De 36 à 65 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5 %
CEM III/B		20 à 34 %	De 66 à 80 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5 %
CEM III/C		5 à 19 %	De 81 à 95 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5 %
CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	De 10 à 35% de pouzzolanes, cendre siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées	0 à 5 %
CEM IV/B		45 à 64 %	à 10%, De 36 à 50% comme ci-dessus	0 à 5 %
CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	De 18 à 30% de laitier de haut-fourneau et 18 à 30 % de cendres siliceuses ou de pouzzolanes,	0 à 5 %
CEM V/B		20 à 39 %	De 31 à 50% de chacun des deux constituants comme ci-dessus	0 à 5 %

Ces composants réagissent avec l'eau pour former des composés solides appelés hydrates de silicate, responsables de la résistance du ciment après durcissement.[5]

### I.6.2. Le sable :

C'est une matière minérale naturelle issue de la désagrégation des roches, trouvée sous forme de sable de mer, de rivière ou de carrière. Sa couleur varie selon sa composition (blanche, grise, jaune...). Il est apprécié pour sa disponibilité et son aspect esthétique. Dans le mortier, il joue un rôle essentiel en réduisant le retrait du liant et en améliorant la cohésion. Les sables bien granulés, contenant des grains fins, moyens et grossiers, assurent une bonne homogénéité en comblant les vides. Le dosage doit se faire en poids plutôt qu'en volume, notamment pour éviter les erreurs liées à l'humidité du sable[6].

et il doit être conforme aux normes P18-541, P18-302 ou NF18-309. Il s'agit d'un matériau inerte qui entre dans la composition des bétons et des mortiers. Dans certains cas, les caractéristiques du sable peuvent s'écarter légèrement de la norme P18-541, ou bien cette norme peut être complétée par les précisions suivantes[7]:

- ✚ Granulométrie: Le module de finesse du sable ne doit pas s'écarter de la valeur nominale de plus ou de moins 20%.
- ✚ .Homogénéité: Le coefficient d'homogénéité (H) doit être supérieur ou égal à 90 % lorsque  $\alpha = 0,4$
- ✚ .Teneur en fines (particules  $0,08 > \text{mm}$ ) :La quantité de particules dont la taille est inférieure à 0,08 mm peut atteindre :

20% pour la valeur supérieure spécifiée, 25% pour la valeur limite absolue, mais uniquement si ces particules représentent les seuls éléments fins du béton de sable.

#### I.6.2.1. Classification des sables :

- **Le sable naturel :**

est une roche sédimentaire meuble, composée principalement de quartz, résultant de la désagrégation des roches riches en quartz sous l'effet de l'érosion physique ou chimique. Les grains sont d'abord gros et anguleux, puis deviennent arrondis et plus fins avec le temps selon le milieu (fluvial, marin, désertique). Ils peuvent se consolider pour former des grès. Plus le sable contient de silice, plus il est clair. On le classe selon ses constituants : sable

quartzeux, micacé, calcaire, etc. Cependant, le terme désigne généralement le sable quartzeux[2].

- **Sable artificiel :**

Provient de concassage des roches naturelles comme le calcaire, ou artificielle(Pouzzolane), dit aussi sable concassé, caractérisées par une meilleure adhérence agrégat/liant [2].

### **I.6.3. L'eau de gâchage :**

L'eau de gâchage peut avoir une influence sur le temps de prise, l'évolution des résistances du béton et la protection des armatures contre la corrosion[8] .

Les eaux naturelles conviennent comme eaux de gâchage du béton, à moins qu'elles ne contiennent des substances qui gênent le durcissement comme certaines eaux usées ou des eaux marécageuses. En cas de doute, une analyse chimique s'impose. En effet, l'eau potable est considérée comme appropriée pour la fabrication du béton et ne nécessite aucun essai [8] .

## **I.7. Les ajouts minéraux :**

Les ajouts minéraux sont des matériaux incorporés au ciment Portland, apportant au béton certaines propriétés spécifiques grâce à leur activité hydraulique et/ou pouzzolanique. Leur utilisation est courante dans les industries du ciment et du béton.[10] sont des matériaux incorporés au béton à des proportions de 10 %, 15 % et 20 % de la masse, dans le but de modifier la microstructure et la macrostructure du béton, ce qui influence ses propriétés rhéologiques et mécaniques. Leur action repose sur trois effets : un effet de remplissage purement physique, une modification physico-chimique du processus d'hydratation, et une réaction chimique de nature pouzzolanique ou hydraulique[11].

### **I.7.1. Classification des ajouts :**

Les ajouts utilisés dans le béton peuvent être d'origine naturelle ou artificielle, et se distinguent par leur caractère inerte ou actif. Ils peuvent intervenir comme des additions au ciment, apportant diverses propriétés selon leur nature [12]. Le cadre normatif français, à travers la norme NF EN 206-1, distingue deux grands types d'additions pour béton hydraulique, en mettant l'accent sur leur fonction :

- ❖ Les additions de type I, dites quasi inertes, incluent :
  - ✓ les additions calcaires (NF P 18-508),
  - ✓ les additions siliceuses (NF P 18-509),
  - ✓ les fillers (NF P 18-501),
  - ✓ la fumée de silice (NF P 18-502).
  
- ❖ Les additions de type II, à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent.
  - ✓ regroupent : les cendres volantes (NF P 18-505),
  - ✓ le laitier de haut fourneau granulé (NF P 18-506).

Cette classification s'inscrit dans un usage industriel précis, visant à optimiser les performances mécaniques et la durabilité des bétons.[12]

#### **I.7.1.1. Les déchets de briques et de tuiles :**

provenant soit de la fabrication soit de la démolition, peuvent être finement broyés et utilisés comme adjuvants minéraux dans le béton. Plusieurs études .Ont montré que ces matériaux, riches en argile calcinée, peuvent améliorer certaines propriétés du béton lorsqu'ils sont utilisés en substitution partielle du ciment[12].

##### **I.7.1.1.1. Poudre de céramique :**

Une définition très générale d'une céramique pourrait être la suivante: une céramique et un matériau inorganique poly cristallin, présentant une structure complexe de grains et joints de grains[9].



**Figure I 7 : déchets céramiques (Source : ALPA Powder Technologie, s.d.)[24].**

La céramique est principalement composée d'argile, de silicates d'alumine et de feldspaths, et elle est fabriquée par un traitement thermique à haute température. Elle est largement utilisée dans le domaine du bâtiment, notamment pour les éléments décoratifs et les appareils sanitaires. Sa production génère environ 30 % de déchets, ce qui pose un problème environnemental important [12], les céramiques sont des matériaux durables et résistants, mais leurs déchets posent un défi environnemental. Leur recyclage dans le bâtiment offre cependant des solutions viables.[14]

Lors de la cuisson, les minéraux de la pâte céramique se transforment sous l'effet de la température et du temps, produisant un mélange de nouveaux minéraux et de phases vitreuses. Aujourd'hui, le terme « céramique » s'étend aussi aux solides inorganiques à liaisons iono-covalentes fabriqués par des procédés similaires. Chimiquement, les céramiques sont principalement des oxydes (comme les aluminosilicates dans les céramiques traditionnelles), des nitrures et des carbures. [14]

Propriétés clés des céramiques :

- Grande résistance mécanique
- Résistance à l'usure et durabilité
- Inertes chimiquement et non toxiques
- Résistance à la chaleur et au feu
- Propriétés isolantes et parfois porosité [14]

Plusieurs études ont exploré la possibilité d'utiliser les déchets de céramique (PC) comme substitution partielle au ciment, en tant qu'agrégat ou filler dans le béton et le mortier[13]. Les résultats ont montré que:

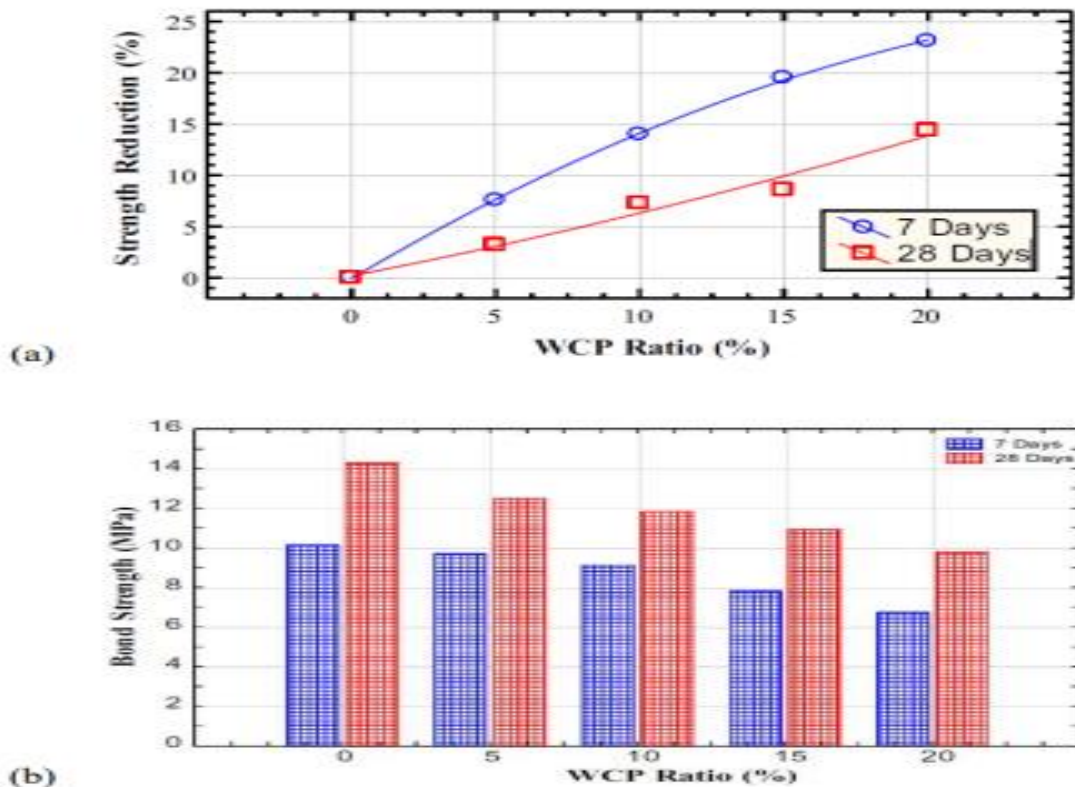
\_Un taux de 10 % de PC améliore la résistance à la compression.

\_Des pourcentages entre 10 % et 20 % contribuent à un meilleur maintien de l'ouvrabilité.

\_Un taux de 40 % améliore la durabilité en réduisant la pénétration des chlorures et en augmentant la résistivité électrique, ce qui renforce la protection contre la corrosion.

\_Des pourcentages élevés (jusqu'à 50 %) ont été utilisés dans des bétons à haute performance, avec des résistances à la compression jugées acceptables.

Cependant, certaines propriétés à l'état durci, comme l'adhérence et la résistance mécanique, peuvent être affectées négativement au-delà du taux optimal. Ces variations sont généralement liées aux différences dans la composition chimique et minéralogique des PC utilisées.[13]



**Figure I 8 : Effet de la teneur en poudre de céramique (WCP : waste cer amic Powder) sur (a) la résistance à la compression, (b) la force d'adhérence [13].**

Les matériaux céramiques et alumineux, bien qu'ils ne possèdent pas de propriétés hydrauliques intrinsèques, présentent une activité pouzzolanique en présence d'eau et d'hydroxyde de calcium. Des études ont montré que les déchets céramiques, une fois calcinés et finement broyés, peuvent réagir avec la portlandite pour former des composés de type C-S-H, améliorant ainsi la densité et la durabilité de la matrice cimentaire. Cette valorisation représente une alternative prometteuse face à la raréfaction des ressources naturelles, les analyses ayant confirmé une efficacité comparable à celle des pouzzolanes traditionnelles après un traitement thermique approprié [14].

### I.7.1.1.2. Poudre de brique :

Les briques sont fabriquées à partir d'argile cuite à une température avoisinant les 1000°C. À partir de 700°C, l'argile perd son eau et subit une transformation chimique pour devenir de la terre cuite. La coloration des briques est due à la présence d'oxyde de fer dans l'argile.[15]En général, la fabrication des briques passe par cinq étapes principales, comme illustré dans la figure



Figure I 9 : Schéma de la fabrication des briques [15]

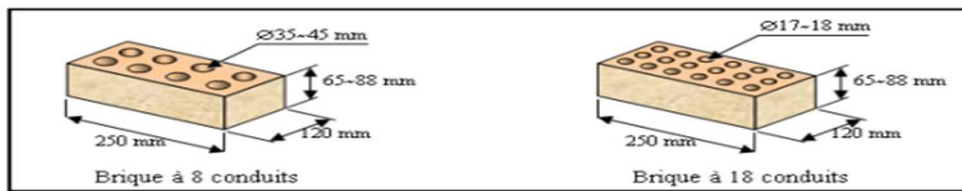
La briqueterie constitue une source importante de production de déchets, principalement sous forme de briques cassées, trop cuites ou mal cuites. En Algérie, ces déchets sont disponibles en grande quantité, représentant environ 10 à 15 % de la production totale, mais ils restent encore peu valorisés.

Les principales utilisations des déchets de brique sont :

- Utilisation comme matériau de remblai.
- Emploi comme granulats pour le remplissage des tranchées de canalisations.
- Recyclage pour le revêtement des terrains de tennis.
- Utilisation de la brique concassée comme granulats grossier ou fin.
- Intégration comme granulats dans les couches de fondation routière.
- Utilisation comme substrat végétal dans certaines applications agricoles.
- Addition minérale dans la fabrication du béton à haute performance.
- Élaboration d'un nouveau ciment composé à base de briques finement broyées.
- Aménagement paysager et espaces verts.
- Substitution aux matériaux naturels tels que le sable.[15]

**Les briques d'argile creuses sont fabriquées** par voie de demi-sèche, avec des dimensions de 250x120x88 mm ou 250x120x65 mm . Elles comportent 8 à 18 conduits (diamètres de 17 à 18 mm), réalisés verticalement ou horizontalement avec des alvéoles parallèles, représentant 40% ou 60% de la section totale. Elles existent en 4 formats (150, 125, 100, 75 mm). La résistance à la compression est de 14 à 16 kg/cm<sup>2</sup>, à la flexion de 18 à 20

kg/cm<sup>2</sup>. L'absorption d'eau est >8%, identique aux briques ordinaires. Les autres exigences techniques sont également identiques à celles des briques ordinaires[2].



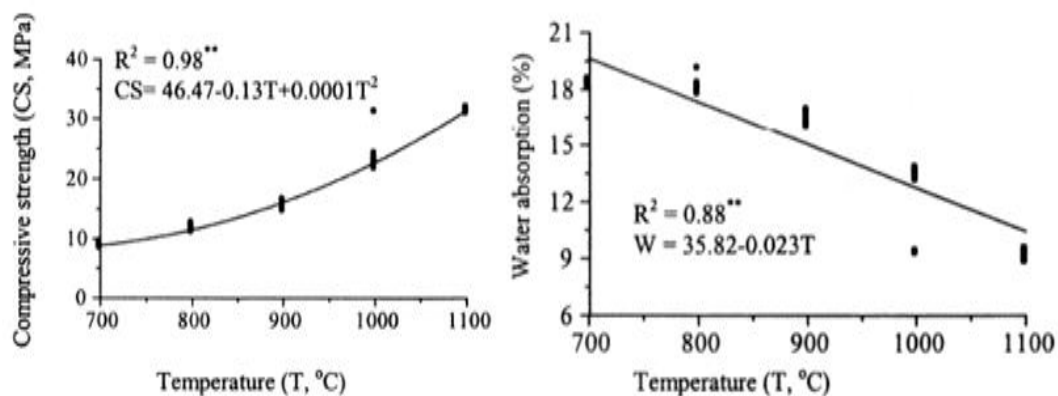
**Figure I 10 : Briques creuses comprimées par voie demi-humide [2]**

la **poudre de brique (PB)** est un matériau fin obtenu par le broyage des déchets provenant de l'industrie des briqueteries ou de la démolition des constructions. Ces déchets représentent environ 10 à 15 % de la production totale, et leur quantité augmente avec la forte consommation de briques. Fabriquées à des températures élevées (1000 à 1100 °C), les briques possèdent un potentiel pouzzolanique lorsque ces déchets sont finement broyés à une finesse comparable à celle du ciment Portland [13].



**figure I 11 : Poudre de brique rouge broyée (source : Chaux Michel Boehm) [25].**

Plusieurs recherches ont démontré que certains matériaux argileux calcinés, comme la brique, peuvent développer une activité pouzzolanique intéressante, contribuant à la formation de C-S-H secondaires. L'utilisation de la PB peut ainsi améliorer la densité de la matrice, réduire l'absorption d'eau jusqu'à 50 %, et conduire à une microstructure plus compacte.[13]



**Figure I 12 : Effet de la température de cuisson de la brique sur (a) la résistance à la compression, (b) l'absorption d'eau [13]**

L'incorporation de la PB dans les mortiers ou bétons, à hauteur de 10 à 20 %, en substitution partielle au ciment ou au clinker, a donné des performances mécaniques et de durabilité satisfaisantes, proches de celles obtenues avec des additions classiques comme les cendres volantes. À court et moyen terme, les résistances sont jugées bonnes, bien que la performance à long terme dépende fortement de la finesse et de l'origine de la PB[13].

Cependant, au-delà de 15 %, une baisse progressive de la résistance mécanique a été observée, quel que soit le type de PB utilisé. Comparée à d'autres matériaux pouzzolaniques comme le méta kaolin (MK1 et MK2), la PB reste légèrement inférieure en termes de performance[13].

D'un point de vue environnemental et économique, l'utilisation de la poudre de brique s'inscrit dans une logique de valorisation des déchets de construction et de réduction de l'utilisation du ciment Portland, ce qui en fait une solution faisable et durable[13].

Les déchets de construction et de démolition, dont les céramiques (briques, carreaux, etc.), représentent une part majeure des déchets mondiaux. Actuellement, ils sont souvent mis

en décharge en raison du manque de normes, de craintes liées aux risques et d'un manque d'expertise sur leur réutilisation [14].

\_La valorisation des déchets inertes vise à réduire l'extraction de ressources vierges. Des recherches (en Espagne, France, Portugal, etc.) ont exploré l'utilisation de déchets céramiques comme ajout dans le béton (ordinaire, haute performance, résistant aux sulfates) et les mortiers. Les résultats sont prometteurs, montrant un potentiel pour une intégration efficace dans le secteur de la construction[14].

### **I.7.1.2. Des études ont été menées sur l'utilisation :**

des déchets provenant de l'industrie de la pierre, tels que la poudre de granit , la poussière de basalte , le calcaire ,la calcite et le marbre , comme adjuvants minéraux pour améliorer les propriétés du béton[12].

#### **I.7.1.2.1. Poudre de marbre :**

**Définition de marbre :** Cest un type de roche calcaire métamorphique, composé principalement de carbonate de calcium (sous forme de calcite ou de dolomite), ainsi que d'autres composés minéraux qui se cristallisent naturellement et peuvent être facilement polis . Lorsqu'il est soumis à une température et une pression élevées, le carbonate de calcium subit une recristallisation, donnant ainsi naissance au marbre . Ce dernier se forme donc directement par la transformation du calcaire sous des conditions thermiques importantes. L'apparence du marbre, qu'elle soit blanche, rouge ou autre, varie selon la nature et la quantité des composants présents ; une forte concentration donne une couleur blanche pure, tandis qu'une faible concentration entraîne des teintes variées . Le marbre est considéré comme une roche ornementale utilisée dans les domaines de la décoration et de la construction, grâce à la diversité de ses couleurs . La majorité de ces couleurs étaient présentes dans les pays du Maghreb et en Andalousie, comme cela sera mentionné dans la recherche[16]



**Figure I 13 : Marbre gris avec surface naturelle non traitée**(Source : Pikbest) [26]

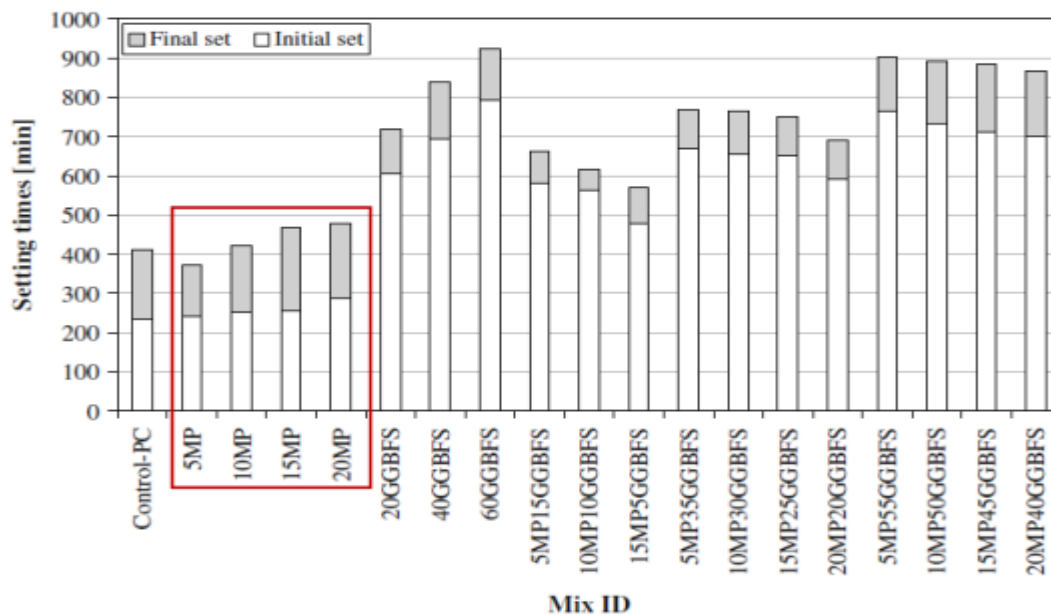
La poudre de marbre fait actuellement l'objet de nombreuses recherches, notamment dans le nord-est de l'Algérie, une région considérée comme la plus riche en marbre en Afrique. L'Algérie dispose de deux principaux gisements[13] :

Le gisement de Fil-Fila, situé à Skikda, connu pour la qualité et la variété de ses marbres (blanc, bleu, vert). Découvert dans les années 1970, il possède d'importantes réserves. Le gisement de Silet, à Tamanrasset, récemment exploité, s'étend sur une bande de 100 km et contient également un marbre de très bonne qualité. Ces ressources permettent de répondre aux besoins du marché local et contribuent à réduire les importations de marbre[13].

L'utilisation de la poudre de marbre (PM) dans le béton présente des avantages environnementaux et économiques, en contribuant à la réduction de la consommation des ressources naturelles. Les études ont montré que l'incorporation de la PM améliore les propriétés des bétons auto plaçants (BAP) à l'état frais et durci, surtout pour des taux de substitution du ciment allant de 5 % à 20 %. Cependant, malgré une meilleure ouvrabilité, une diminution de la résistance à la compression et de la vitesse de propagation des ondes peut être observée. La poudre de marbre (PM) fait l'objet de nombreuses recherches, notamment pour son incorporation dans les bétons. Cette utilisation contribue au développement durable en réduisant la consommation des ressources naturelles. Plusieurs études ont montré que la PM améliore les propriétés des bétons autoplaçants (BAP) à l'état frais et durci[13].

L'ajout de PM, à des taux de substitution de 5%, 10%, 15% et 20% du ciment, peut avoir des effets positifs sur les performances du béton. En Algérie, des gisements importants de marbre sont présents, notamment à Skikda (Fil-Fila) et à Tamanrasset (Silet), ces gisements étant riches en marbre de bonne qualité, disponible en plusieurs couleurs (blanc,

bleu, vert). L'exploitation de ces gisements répond aux besoins du marché local et permet de réduire les importations[13].



**Figure I 14 : Effet des matériaux cimentaires sur les temps de début et de fin de prise [13].**

Les études ont démontré qu'une substitution de 10% de poudre de marbre entraîne une amélioration de la résistance à la compression du béton en raison de sa grande finesse. Dans une étude précédente, l'utilisation de 30% de poudre de marbre a également donné des résultats positifs pour les propriétés mécaniques [13].

Il a été observé que l'ajout de poudre de marbre (PM) à des proportions de 10 % à 15% entraîne une augmentation de la résistance à la compression et à la traction de l'ordre de 15 % à 20 %. Par ailleurs, il est possible de formuler un éco-béton auto-plaçant avec un rapport eau/ciment (E/C) inférieur à 0,55 et un pourcentage de PM allant jusqu'à 60 %. De plus, la substitution partielle du sable par 15 % de PM améliore la résistance du béton à la carbonatation[13].

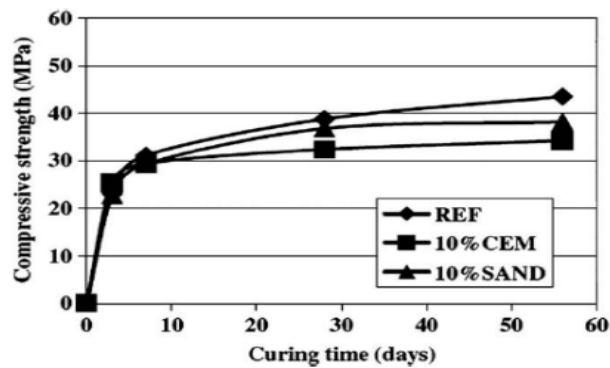


Figure I 15 :Influence de substitution du sable et du ciment par 10% de poudre de marbre sur la résistance à la compression [13].

L'ajout de 20 % de poudre de marbre locale permet d'améliorer les propriétés rhéologiques, physico-mécaniques et la durabilité des bétons en milieu sulfatique, tout en assurant une résistance à la compression allant jusqu'à 35 MPa. Ce taux optimise également l'étalement en milieu libre et confiné, et représente une solution économiquement rentable. Bien que des taux de 5 % à 10 % soient possibles, 20 % reste le plus adapté selon les exigences de résistance et de durabilité [13].

Les résultats de différentes recherches menées sur la PM témoignent et encouragent les fabricants des ciments sur la faisabilité d'utiliser la PM comme un filler alternative au filler calcaire.

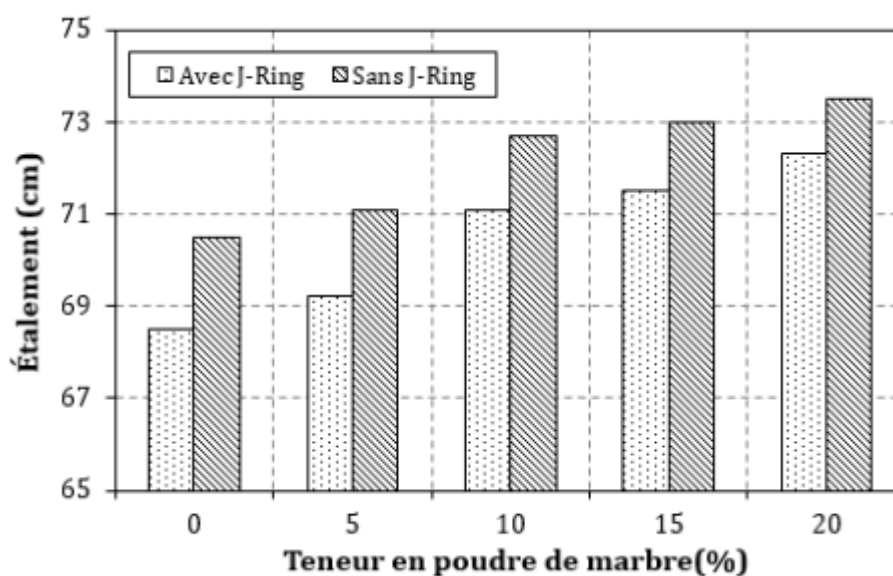


Figure I 16 : Evolution de l'étalement en fonction de la teneur en poudre de marbre [13].

### **I.7.2. Action des additions minérales :**

Les additions minérales influencent les matériaux cimentaires à travers trois effets principaux :

1. Effet granulaire : Résulte de la modification de la structure granulaire en présence d'eau (et éventuellement d'adjuvants), ce qui affecte les propriétés rhéologiques et la compacité du matériau à l'état frais.
2. Effet physico-chimique et microstructural : Causé par les interactions entre les particules de l'addition et le processus d'hydratation du ciment. Il modifie la microstructure et influe sur le développement des propriétés mécaniques (notamment pour les additions de type II selon la norme EN 206-1).
3. Effet chimique : Propre à certaines additions réactives, il influence directement la cinétique et l'évolution de l'hydratation du ciment durant la prise et le durcissement.[18]

### **I.7.3. Effet granulaire et durabilité des granulats :**

L'effet granulaire désigne les modifications dans les propriétés du mélange cimentaire dues à la présence de particules fines ou ultrafines dans le squelette solide. Il influence l'arrangement des grains, réduit les vides, diminue les frictions et améliore la compacité et la mise en place du mélange. Cet effet peut être favorable lorsque les particules remplissent bien les pores, améliorant ainsi l'écoulement et la densité. En revanche, il peut être défavorable si les particules augmentent les frictions ou ont une forme irrégulière, ce qui accroît le besoin en eau et réduit la compacité. Par ailleurs, la durabilité du granulat joue un rôle crucial dans la performance globale du mélange, notamment face aux actions climatiques. Lorsque ses propriétés mécaniques sont faibles, le granulat se détériore progressivement sous l'effet combiné du trafic et des cycles de gel-dégel. Des essais tels que le micro-Deval et le Los Angeles sont essentiels pour évaluer sa résistance à l'usure et à la fragmentation (Langlois et coll., 2001).[17]

## **I.8. L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil :**

La recherche de liants moins coûteux à base de déchets industriels et de ressources naturelles est devenue essentielle pour compenser le manque de production du ciment Portland. Les ajouts servent à améliorer les propriétés du béton ou à lui conférer des

caractéristiques particulières. Ils sont souvent moins chers que le ciment Portland et offrent des avantages économiques, écologiques et techniques.[18]

### **I.8.1. Avantages économiques :**

Le ciment Portland constitue généralement l'élément le plus onéreux dans un mélange de béton, en raison de sa fabrication à forte intensité énergétique. Dans un monde menacé par les émissions de CO<sub>2</sub>, ce gaz carbonique devient un enjeu majeur. La plupart des matériaux pouvant se substituer au ciment dans le béton sont des sous-produits industriels, et à ce titre, ils nécessitent relativement peu d'énergie, voire aucune, ce qui les rend nettement moins coûteux que le ciment Portland. Toutefois, si la demande en béton ne diminue pas, le prix des ajouts cimentaires pourrait devenir comparable à celui du ciment. En parallèle, la distance entre la source des ajouts cimentaires et l'utilisateur final, ainsi que le coût élevé du transport, peuvent compromettre leurs avantages économiques potentiels. De plus, le manque de capacités de stockage abordables représente parfois une barrière à leur utilisation sur certains marchés. Bien qu'il soit difficile de prédire l'évolution du secteur, ces facteurs pourraient au final influencer la véritable valeur économique de ces matériaux [ 19] .

### **I.8.2. Avantages écologiques :**

La production d'une tonne de ciment Portland génère une quantité importante de CO<sub>2</sub> en raison de son procédé de fabrication énergivore. En comparaison, l'utilisation d'ajouts cimentaires comme les cendres volantes et les fumées de silice, qui ne nécessitent pas de traitement intense, permet de réduire considérablement ces émissions. Le laitier de haut fourneau, bien qu'il doive être granulé, émet environ 0,07 tonne de CO<sub>2</sub> par tonne produite, ce qui reste bien inférieur à celui du ciment Portland. À cela s'ajoutent les émissions liées au transport des matériaux : par exemple, le transport d'une tonne d'ajouts cimentaires sur 1 000 km engendre environ 0,022 tonne de CO<sub>2</sub>. Ainsi, bien que les ajouts permettent de réduire les émissions globales, il est essentiel de prendre en compte tous les paramètres — production, traitement et transport — pour évaluer avec précision leurs avantages écologiques par rapport au ciment Portland [ 19].

### **I.8.3. Avantages techniques :**

L'incorporation de particules très fines dans le béton permet tout d'abord d'améliorer sa maniabilité et de réduire la quantité d'eau nécessaire pour atteindre une consistance

donnée, sauf dans le cas de matériaux à très grande surface spécifique comme les fumées de silice. Ensuite, les ajouts cimentaires contribuent généralement à améliorer la résistance à la compression, l'imperméabilité du béton et sa résistance aux attaques chimiques. De plus, la faible chaleur d'hydratation des ciments composés aide à limiter la fissuration, notamment en climat chaud, ce qui améliore la durabilité globale du béton [19].

## **I.9. Effets des ajouts sur les matériaux cimentaires :**

### **I.9.1. Amélioration de l'ouvrabilité :**

L'ajout de poudres fines dans le béton permet de réduire le ressuage et la ségrégation en diminuant les vides. L'utilisation de cendres volantes ou de laitier réduit le besoin en eau pour une consistance donnée, contrairement aux fumées de silice qui, en raison de leur très grande surface spécifique, augmentent cette demande en eau. La maniabilité et la demande en eau dépendent aussi de la forme et de la granulométrie des particules. Selon la norme ASTM C 618, la quantité de particules supérieures à 45 µm ne doit pas dépasser 34 % [12].

### **I.9.2. Durabilité :**

Par rapport au ciment Portland, le ciment avec ajouts pouzzolaniques, comme le laitier, présente une meilleure imperméabilité pour un même rapport E/L, ainsi qu'une réduction de la quantité de CH et d'aluminates dans le mélange. Ces caractéristiques améliorent la résistance du béton aux attaques sulfatiques, puisque les sulfates réagissent avec les aluminates pour former de l'étrangéité expansive. Grâce à une faible perméabilité et à une quantité réduite de CH, ces bétons résistent aussi aux réactions alcali-granulats, les alcalis étant piégés dans le gel C-S-H. Et malgré une teneur importante en C3A, ce type de ciment confère au béton une bonne résistance aux acides et aux sulfates, grâce à l'effet combiné d'une meilleure imperméabilité et d'une faible teneur en CH [12].

L'incorporation de la poudre de déchet de marbre (MGWP) à un taux de 10 à 15 % améliore la durabilité du mortier en réduisant l'absorption d'eau, en renforçant la résistance aux attaques sulfatiques et en densifiant la microstructure. Ces améliorations sont dues à un effet de comblement des vides ainsi qu'à une formation supplémentaire du gel C-S-H, ce qui diminue la porosité et limite la pénétration des agents agressifs [20].

### **I.9.3. Développement des résistances :**

Selon Taylor (2003,p .261), l'utilisation d'additions minérales telles que les cendres volantes ou le laitier de haut fourneau contribue à l'amélioration de la microstructure de la pâte cimentaire et à l'augmentation de la formation du gel C-S-H, ce qui renforce la résistance à long terme[23].

Dans le cadre de ce travail, bien que les additions utilisées soient différentes (déchets de briques, de céramique et de marbre), elles sont destinées à produire des effets similaires en termes de raffinement de la structure et de développement des résistances.

### **I.9.4. Le développement des mortiers à haute résistance :**

repose en grande partie sur la nature et les caractéristiques physiques des sables utilisés. Les sables calcaires, plus grossiers et moins fins, ont permis d'obtenir des mortiers présentant des résistances mécaniques plus élevées, notamment en traction et en compression, comparés aux mortiers à base de sable siliceux ou normalisé. Cette supériorité est liée à leur granulométrie avantageuse et à leur moindre besoin en eau, assurant ainsi une meilleure compacité et une hydratation plus efficace. L'élévation de la température a montré que certains de ces mortiers, notamment ceux à base de sable calcaire SC2, conservent mieux leurs propriétés mécaniques, confirmant leur potentiel pour des applications à haute performance thermique[21].

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les concepts fondamentaux relatifs au ciment et à ses composants — de sa définition et de ses types jusqu'à la description de ses constituants principaux (clinker, gypse) — puis nous avons présenté les additions minérales issues de déchets (poudre de marbre, éclats de céramique et fragments de brique) ainsi que leurs propriétés physico-chimiques. La revue de la littérature révèle que la substitution d'une partie du ciment par ces additions améliore les performances mécaniques et la résistance à la fissuration (poudre de marbre et céramique) tout en renforçant la durabilité (fragments de brique).

Ce socle théorique prépare les essais expérimentaux à venir et se concentre directement sur l'objectif principal de la mémoire : optimiser les performances et la durabilité du ciment par substitution de matériaux alternatifs durables.

# **Chapitre II**

# **Matériaux et**

# **procédure**

## II.1. Introduction:

Dans ce chapitre, nous allons aborder les matériaux utilisés dans cette étude ainsi que leurs caractéristiques. Ensuite, nous décrirons la méthode de préparation des échantillons ainsi que les différents essais qui ont été réalisés.

## II.2. Matériaux utilisés : Propriétés et caractérisation:

- ❖ CEMI42.5
- ❖ Matériaux d'addition
- ❖ Sable 0/5
- ❖ L'eau

### II.2.1. Le ciment:

Le ciment utilisé dans l'ensemble des mélanges est un ciment Portland de type CEM I 42.5, de couleur grise, fourni par la cimenterie de Biskra. Il est principalement constitué de clinker, avec une faible teneur en gypse. Les caractéristiques physico-chimiques du ciment inscrite sur la fiche technique sont données dans les Tableaux.

**tableau II 1 : Analyses chimiques**

Analyses chimique (%)	Valeur
Perte au feu	< 3
Teneur en sulfates (SO <sub>3</sub> )	2.2- 2.6
Teneur en oxyde de magnésium (MgO)	< 3.5
Teneur en chlorures (cl-)	< 0.04
Résidu insoluble	< 0.75

**tableau II 2 : Composition minéralogique du ciment**

Composition potentielle du clinker (selon bogue) (%)	Valeur
C3S	60
C3A	< 3
C4AF+2 C3A	< 20

**tableau II 2 : Caractéristiques physiques du ciment**

Propriétés physique	Valeur
Consistance normale de la pâte (%)	26.5
Expansion à chaud (mm)	< 1
Début de prise (minutes)	180
Fin de prise (minutes)	320

**tableau II 3 : Résistance à la compression**

Résistance à la compression	Valeur
2 jours (MPA)	18
28 jours (MPA)	54

### II.2.2. Matériaux d'additions :

Dans cette étude, des déchets de marbre, de céramique et de brique ont été utilisés, lesquels ont été broyés afin d'obtenir une poudre fine ayant une finesse proche de celle du ciment.

#### II.2.2.1. Déchets de marbre :

Les déchets de marbre utilisés dans la formulation des mélanges que nous avons préparés ont été récupérés auprès des ateliers de découpe de marbre, puis broyés et tamisés à l'aide d'un tamis de 0,08 mm .

**figure II 1 : Déchets de marbre.**

**tableau II 4 : Caractéristiques physiques de déchets de marbre.**

Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.5
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.07
Granulométrie	0.08mm

**II.2.2.2. Déchets de brique :**

Les déchets de brique utilisés proviennent du concassage de briques rouges neuves, puis sont tamisés de manière à obtenir des particules dont la taille est inférieure à 80 micromètres.

**figure II 2: Déchets de brique****tableau II 5 : Caractéristiques physiques de déchetsde brique**

Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.45
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	0.85
Granulométrie	0.08mm

### II.2.2.3. Déchets de céramique

Nous avons obtenu cette poudre en broyant des résidus d'objets en céramique que nous avons collectés dans des ateliers, puis en les tamisant jusqu'à atteindre une finesse comparable à celle du ciment.



figure II 3 : Déchets de céramique.

tableau II 6 : Caractéristiques physiques de déchetsde céramique.

Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.3
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	0.90
Granulométrie	0.08mm

### II.2.3. Sable :

Dans notre étude, nous avons utilisé du sable alluvionnaire provenant de la sablière située à Djamaa, dans la wilaya d'El Oued, dont la granulométrie varie de 0 à 5 mm (voire figure II.4).



figure II 4 : Sable alluviorinaire(SA).

Cet essai repose sur le classement des particules constituant l'échantillon à l'aide d'une série de tamis aux ouvertures décroissantes, disposés du haut vers le bas. L'échantillon préparé est placé sur le tamis supérieur, puis l'ensemble de la colonne est soumis à des vibrations à l'aide d'un appareil de tamisage. Une fois l'opération terminée, les résultats sont présentés dans un tableau accompagné de la courbe granulométrique .

Cet essai est défini par la norme NF P 18-560. [1]



figure II 5 : Tamis d'analyse granulométrique.

### **Le module de finesse : Norme Française [NFP 18-540]**

La module de finesse est égal au 1/100 e de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm, déterminée selon la norme NFP 18-540. [2]

$$MF = \sum RC / 100$$

RC : refus cumulé en (%) sous les tamis.

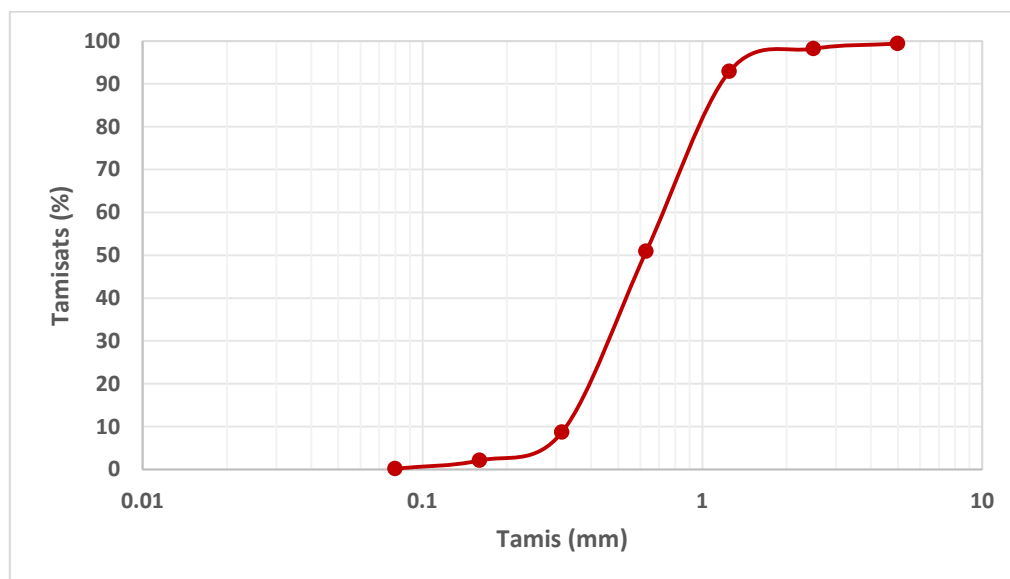
#### **Lorsque MF est compris entre :**

- 1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins,
- 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel,
- 2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables.

tableau II 7 : Résultats d'analyse granulométrique du sable utilisé.

Tamis	Refus (g)	Refus cumulés	Refus (%)	Tamisats (%)
5	6	6	0.6	99.4
2.5	12	18	1.8	98.2
1.25	53	71	7.1	92.9
0.63	420	491	49.1	50.9
0.315	422	913	91.3	8.7
0.16	66	979	97.9	2.1
0.08	19	998	99.8	0.2
Fond	2	1000	100	0
<b>MF= 2.4</b>				

- ❖ D'après le module de finesse obtenu dans cet essai en classé l'échantillon classe 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel.



Graphie II 1 La courbe granulométrique de sable utilisé.

### Essai de La masse volumique apparente :

Cet essai est régi par la norme NF P18-555 [3], elle est définie comme étant la masse de l'unité de volume apparente du corps, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

$$\gamma = \frac{M}{V}$$

Où :

$\gamma$  : Masse volumique apparente.

M : Masse du matériau.

V : Volume total du matériau.



figure II 6 Essai de la masse volumique apparente.

tableau II 8 : résultats de la masse volumique apparent de sable.

Valeur	Echantillon
V=785.4cm <sup>3</sup>	
Masse du matériau : M (g)	1249
Masse volumique apparente : $\gamma$ (g/ cm <sup>3</sup> )	1.59

#### Essai de La masse volumique absolue :

Cet essai est régi par la norme NF P18-555[3], elle est définie comme étant la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains.

$$\gamma_s = \frac{M_s}{V_s}$$

Où :

$\gamma_s$ : Masse volumique absolue .

M<sub>s</sub> : Masse du matériau.

V<sub>s</sub> : Volume total du matériau solide.



figure II 7 : Essai de La masse volumique absolue.

tableau II 9 :résultats de la masse volumique absolue de sable.

Valeur	Echantillon
Masse du matériau : M (g)	<b>300</b>
Volume total du matériau solide: Vs	<b>120</b>
Masse volumique absolue : $\gamma_s$ (g/ cm <sup>3</sup> )	<b>2.72</b>

### II.2.3.1. Essai de l'équivalent de sable :

Cet essai est défini par la norme NF P 18-598[4], permettant de mesurer la propriété d'un sable.

L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du sable à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

- hauteur h1 : sable propre + éléments fins
- hauteur h2 : sable propre seulement. On en déduit l'équivalent de sable par la relation ci-dessous :

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

- ✓ Selon que la hauteur h2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine : équivalent de sable visuel ESV et équivalent de sable au piston (ESP).

**Classification des sables :**

tableau II 10 : Préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les mortiers

ES	ESV	Qualité de sable
ES >60	ESV <65	Sable argileux; risque de retrait ou de gonflement de béton.
$60 \leq ES < 70$	$65 \leq ESV < 75$	Sable légèrement argileux; de propreté admissible
$70 \leq ES < 80$	$75 \leq ESV < 85$	Sable propre; convenant au béton à haute qualité



figure II 8 : Essai de l'équivalent de sable

tableau II 11 : résultat de l'essai de l'équivalent du sable utilisé.

Paramètre	Equivalent de sable visuel	Equivalent de sable par piston
H1 (cm)	18.5	18.5
H2 (cm)	9.4	10.2
ES (%)	50.81	55.13
<b>Classification</b>	Sable argileux	

#### II.2.4. Eau de gâchage :

Dans cette étude, l'eau du robinet disponible au laboratoire de génie civil a été utilisée comme eau de gâchage pour la préparation des différents mélanges.

### II.3. Matériels utilisés :

#### II.3.1. Moules :

Le moule doit comporter trois compartiments horizontaux permettant de couler simultanément trois éprouvettes de dimensions 4×4×16 cm. Il est fabriqué en acier d'environ 10 mm d'épaisseur, avec des parois internes durcies (dureté minimale de 200 HV, idéalement 400 HV) pour éviter l'usure. Le design doit permettre un démoulage facile sans endommager les échantillons.

Le moule est fixé sur une base métallique rigide afin d'éviter les vibrations ou les fuites pendant l'utilisation. Un cadre métallique (hausse) est également utilisé pour faciliter le coulage. Il doit être solidement ajusté et muni d'un dispositif de positionnement précis.

Enfin, des outils simples comme deux spatules et une règle métallique sont utilisés pour lisser la surface du mortier après le coulage [5].

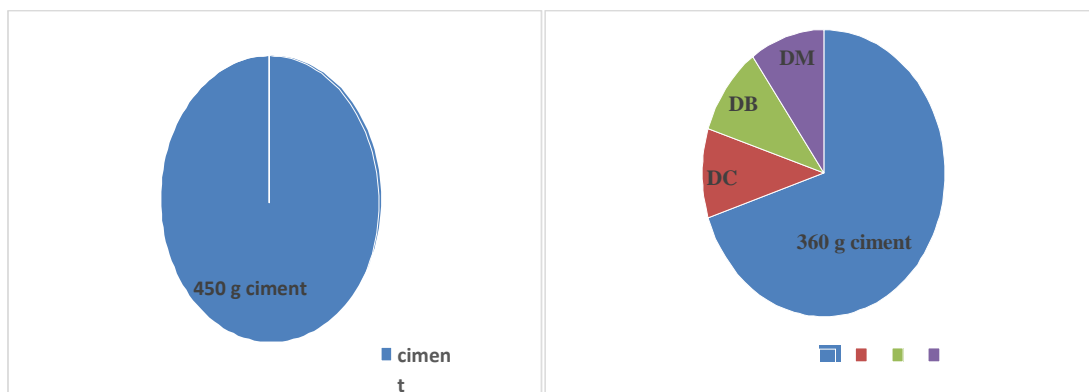


figure II 9 : moule (4 ×4×16)

#### II.4. Formulation du mortier :

Nous allons travailler avec un plan de mélange comportant trois facteurs (déchets de marbre, déchets de brique et déchets de céramique), exprimés en proportions massiques, dont la somme est égale à l'unité, avec une substitution du ciment pouvant atteindre 20 % (soit l'équivalent de 90 grammes de ciment). Cela signifie que ces facteurs sont interdépendants. Par conséquent, le domaine expérimental est contraint par la relation suivante :

$$DM + DB + DC = 1$$



(a) Masse initiale de ciment

(b) Substitution de ciment

figure II 10 : Substitution de ciment par des ajouts minéraux.

- Un plan de mélange comprenant 10 expériences a été élaboré afin d'évaluer l'influence de ces facteurs sur les propriétés du mortier.

tableau II 12 : Proportions des facteurs dans les compositions étudiées.

Mélange	Déchets de marbre	Déchets de brique	Déchets de céramique
1	20%	0%	0%
2	13.3%	6.6%	0%
3	6.6%	13.3%	0%
4	0%	20%	0%
5	13.3%	0%	6.6%
6	6.6%	6.6%	6.6%
7	0%	13.3%	6.6%
8	6.6%	0%	13.3%
9	0%	6.6%	13.3%

<b>10</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>20%</b>
-----------	-----------	-----------	------------

- Selon (EN 196-1) Le mortier doit être composé en masse, d'une partie de ciment, de trois parties de sable et d'une demi partie d'eau.

**tableau II 13 : Les quantités de chaque mélange.**

<b>Mélange</b>	<b>Ciment (g)</b>	<b>Sable (g)</b>	<b>Eau (g)</b>	<b>Marbre (g)</b>	<b>Brique (g)</b>	<b>Céramique (g)</b>
<b>1</b>	<b>360</b>	<b>1350</b>	<b>225</b>	<b>90</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>2</b>				<b>60</b>	<b>30</b>	<b>0</b>
<b>3</b>				<b>30</b>	<b>60</b>	<b>0</b>
<b>4</b>				<b>0</b>	<b>90</b>	<b>0</b>
<b>5</b>				<b>60</b>	<b>0</b>	<b>30</b>
<b>6</b>				<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>7</b>				<b>0</b>	<b>60</b>	<b>30</b>
<b>8</b>				<b>30</b>	<b>0</b>	<b>60</b>
<b>9</b>				<b>0</b>	<b>30</b>	<b>60</b>
<b>10</b>				<b>0</b>	<b>0</b>	<b>90</b>

### **II.5. Malaxage du mortier :**

Après avoir pesé tous les composants entrant dans la composition du mortier pour chaque formulation, on commence par mélanger manuellement les ingrédients secs (ciment, sable, déchets de briques, déchets de marbre et céramique) selon le pourcentage de chaque formulation pendant 4 minutes dans le récipient jusqu'à obtenir un mélange homogène, puis on ajoute l'eau progressivement. (voir figure II.10)



figure II 11 : Les étapes malaxage du mortier

## II.6. Préparation des éprouvettes :

### II.6.1. Moulage des éprouvettes :

Dans ce travail, nous avons préparé des éprouvettes de dimensions  $(4 \times 4 \times 16)$  cm. Les moules sont lubrifiés avec de l'huile afin d'éviter que le mortier ne colle aux parois. Ensuite, le mélange est versé et rempli jusqu'à un niveau prédéfini. Après cela, le moule est secoué 60 fois vers la gauche et la droite. Puis, on le remplit complètement et on le secoue de nouveau de la même manière. La surface est ensuite nivelée, et on laisse sécher pendant 24 heures. Enfin, les moules sont retirés après 24 heures, et le contenu de chaque formulation est inscrit sur son éprouvette.



figure II 13 : les étapes de Moulage des éprouvettes

## II.7. Les essais réalisés sur le mortier à l'état durci :

Nous avons procédé à des essais sur les échantillons afin d'étudier les caractéristiques mécaniques, en déterminant la résistance à la compression et à la flexion sur des éprouvettes d'essai de dimensions (4×4×16 cm), aux âges de 7, 28 et 60 jours.

La durabilité a été évaluée à travers l'essai d'absorption d'eau par immersion et l'absorption capillaire, réalisés sur les éprouvettes après 28 jours.

### II.7.1. Résistance à la compression :

La résistance à la compression peut être mesurée sur des éprouvettes cylindriques, cubiques ou prismatiques, conformément à la norme EN 196-1.[6]

Dans notre cas, l'essai est réalisé sur des demi-prismes issus de l'essai de flexion.

L'échantillon est soumis à une charge croissante jusqu'à la rupture, à l'aide d'une presse hydraulique d'une capacité d'environ 2000 kN, équipée d'un écran numérique permettant d'introduire la surface de la section de l'éprouvette, puis de calculer la résistance à la compression

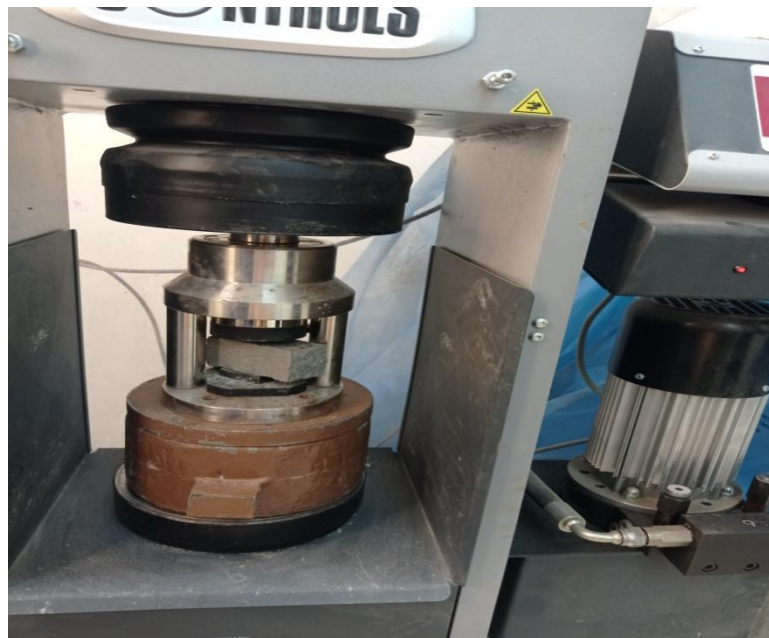


figure II 14 : Essai résistance à la compression

### II.7.2. Résistance à la flexion (trois points) :

L'essai de résistance à la traction est effectué conformément à la norme EN 196-1 [6].

La méthode consiste à placer les éprouvettes prismatiques sur deux appuis et à leur appliquer une charge croissante et centrée au milieu, sans chocs, à une vitesse de chargement de  $50 \text{ N/s} \pm 10 \text{ N/s}$ , jusqu'à la rupture (voir figure II.13).

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

$$R_f = \frac{1,5 F_f \times L}{b^3}$$

$F_f$  : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.  $L$  : La distance entre les appuis ( $L = 100 \text{ mm}$ ).  $b$  : Le côté de la section carrée de l'éprouvette ( $b = 40 \text{ mm}$ ). Si  $F_f$  est exprimée en newtons (N), cette résistance exprimée en méga pascals (MPa) vaut :  $R_f \text{ (MPa)} = 0.234 F_f \text{ (N)}$ .



figure II 15 : Essai résistance à la flexion.

## II.8. Essai sur la durabilité :

### II.8.1. Essai d'absorption par immersion:

Cet essai a été réalisé afin de donner une idée sur la porosité interne du matériau, en déterminant la quantité d'eau que peuvent absorber les éprouvettes après une immersion totale pendant une période donnée.

Il convient de rappeler que cet essai consiste à sécher les éprouvettes prismatiques de mortier de dimensions (4×4×16) cm<sup>3</sup> jusqu'à obtention de la masse sèche constante, dans une étuve ventilée maintenue à une température de 105 °C. Ensuite, les éprouvettes sont totalement immergées dans un bac à eau pendant 24 heures, jusqu'à saturation complète du matériau. Avant la pesée, chaque éprouvette est essuyée à l'aide d'une éponge humide afin d'éliminer l'eau superficielle. La masse est considérée comme constante lorsque la différence entre deux pesées successives, espacées de 24 heures, ne dépasse pas 0,1 %. La quantité d'eau absorbée est alors déterminée [7].

L'absorption d'eau par immersion ( $A_b$ ) est exprimée en pourcentage de la masse sèche, et elle est calculée par la relation suivante:

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100$$



figure II 17 : Essai d'absorption par immersion.

### II.8.2. Essai d'absorption capillaire :

Ce test mesure le taux d'absorption d'eau par capillarité des échantillons non saturés de mortier, mis en contact avec l'eau sans pression hydraulique.[8]

L'absorption par capillarité est le phénomène physique susceptible de faire pénétrer des substances agressives extérieures à l'intérieur du mortier et béton. En effet, le béton et mortier est un matériau qui possède des pores capillaires dont la dimension varie suivant ses caractéristiques de composition (rapport E/L (équivalent), additions minérales, etc.). Lorsqu'un liquide se retrouve en contact avec ce type de pore, des tensions de surface font remonter ce liquide à l'intérieur du capillaire. Le liquide monte d'autant plus haut que le diamètre du capillaire est petit (loi de Jurin). Les pores capillaires ouverts sur le milieu extérieur vont donc conduire, dans certaines conditions (principalement d'humidité), à laisser s'infiltrer par succion des liquides pouvant contenir des espèces chimiques potentiellement préjudiciables au bon fonctionnement et à la durée de vie du matériau [9].

Ce test fournit des informations générales sur la structure et l'importance du réseau capillaire. Il est également utilisé comme complément à d'autres essais pour évaluer la durabilité du mortier.

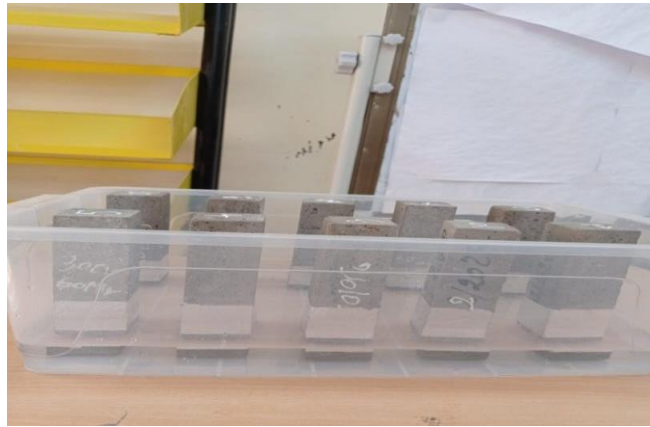
Les échantillons sont placés dans un four pendant 24 heures afin de sécher l'eau présente dans les pores. Ensuite, chaque échantillon est recouvert de papier aluminium autocollant sur la face supérieure et les côtés pour éviter l'évaporation de l'eau absorbée pendant l'essai.

Les échantillons sont ensuite immergés à une hauteur de 1 cm dans l'eau du récipient. À chaque moment de mesure, les échantillons sont retirés, essuyés avec une éponge, puis pesés avant d'être remis dans le récipient.

Les mesures sont prises aux intervalles suivants : 5 minutes, 10 minutes, 20 minutes, 30 minutes, 60 minutes, 1 heure, 2 heures, 3 heures, 4 heures, 6 heures, 24 heures, 48 heures, 72 heures [10].

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

$$CA = \frac{M_j - M_0}{S \times t^{1/2}}$$



**figure II 18 : Essai d'absorption capillaire.**

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les matériaux et les techniques expérimentales utilisés dans cette étude, en commençant par la caractérisation des différents constituants, considérée comme une étape essentielle pour comprendre clairement le comportement du mortier cimentaire, aussi bien à un jeune âge qu'à un âge avancé. Les résultats obtenus à partir des essais en laboratoire sur le mortier cimentaire seront présentés et analysés dans le chapitre suivant.



# **Chapitre III**

## **Résultats et discussion**

### III.3. Introduction

Ce chapitre présente et analyse les résultats obtenus pour les mélanges cimentaires, en mettant l'accent sur plusieurs propriétés essentielles : la résistance à la compression après 7, 28 et 60 jours, l'absorption par immersion et l'absorption capillaire. Une analyse statistique approfondie est également réalisée afin d'évaluer la signification des résultats et la précision des modèles utilisés.

Les réponses des différents mélanges cimentaires aux variations de composition — notamment l'ajout de déchets de céramique, de marbre et de brique — sont étudiées. Cette analyse permet de déterminer les formulations optimales des composants afin d'obtenir des mélanges cimentaires aux propriétés améliorées.

### III.2. Résultats et discussion

#### III.2.1. Résultats de résistance à la compression

La résistance à la compression de dix formulations contenant différentes proportions de déchets minéraux — marbre, brique et céramique — a été évaluée à 7, 28 et 60 jours dans le cadre d'un plan de mélange contrôlé, avec un taux de substitution total fixe de 20 %. Les proportions des déchets dans chaque mélange étaient de 20 %, 13,3 % ou 6,6 %, permettant une diversité dans la composition des formulations.

Pour les mélanges simples, la brique utilisée seule à hauteur de 20 % s'est distinguée par une activité pouzzolanique notable. Elle a atteint une résistance moyenne d'environ 19,8 MPa à 28 jours, augmentant jusqu'à 24,2 MPa à 60 jours. Cette amélioration est attribuée à la réaction chimique entre les composants de la brique ( $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et l'hydroxyde de calcium issu de l'hydratation du ciment, générant des composés silicatés de calcium hydratés (CSH) qui renforcent la cohésion et la rigidité du matériau (Harbi, 2018 ; Boukour, 2017) [1,2].

Le marbre, utilisé seul à 20 %, a montré une progression régulière de la résistance, passant de 16,6 MPa à 7 jours à 24,6 MPa à 60 jours. Bien qu'il ne participe pas à des réactions chimiques, il agit comme un filler (charge minérale) qui améliore la densité globale du matériau (Felkaoui, 2024) [4].

La céramique, également utilisée seule à 20 %, a présenté une résistance correcte à 28 jours (~20,7 MPa), mais avec une baisse à 60 jours, ce qui révèle son inertie chimique dans un environnement alcalin (Belouadah, 2018) [3]

Concernant les mélanges binaires, les combinaisons brique-marbre à 13,3 % et 6,6 % respectivement (ou l'inverse) ont montré de bonnes performances, résultant d'un équilibre entre la réactivité chimique de la brique et l'effet densifiant du marbre. En revanche, les mélanges comportant de la céramique avec du marbre ou de la brique ont présenté des performances plus variables, avec parfois une baisse à long terme, attribuée à la faible réactivité de la céramique.

Le mélange ternaire contenant 6,6 % de chaque déchet a affiché une résistance modérée et stable à 28 jours (environ 21,8 MPa), suivie d'une légère baisse à 60 jours. Cela suggère que l'équilibre entre effet filler et activité réactive peut améliorer les propriétés mécaniques à moyen terme, sans toutefois garantir une performance optimale à long terme (Felkaoui, 2024) [4].

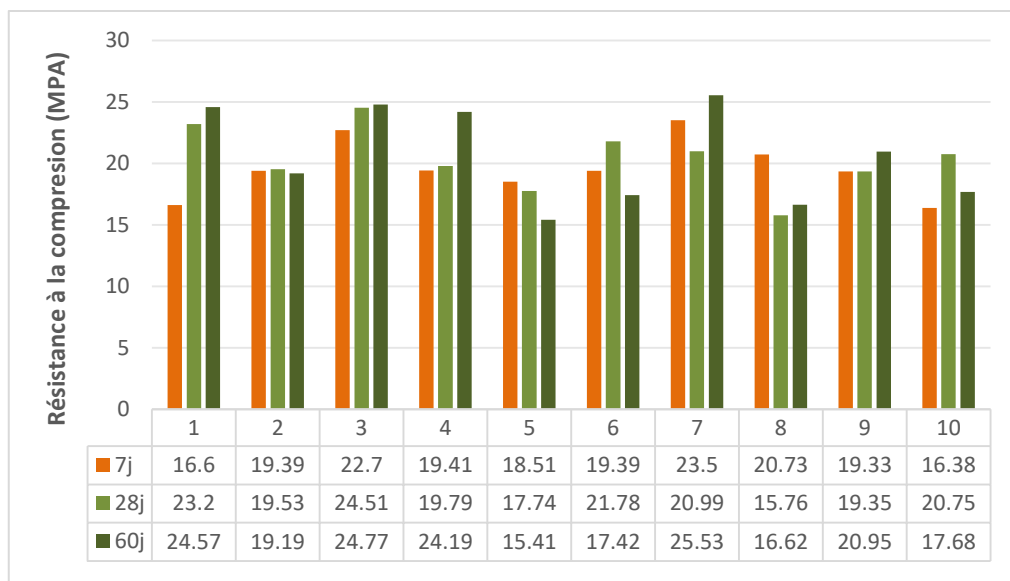


figure III 1 : Résultats de résistance à la compression

### III.2.2. Résultats de résistance à la flexion

Pour les mélanges simples avec un taux de substitution de 20 % : Le mélange M1 (marbre seul) a enregistré la résistance la plus élevée à 7 jours (3,69 MPa), suivie d'une baisse à 28 jours, puis d'un retour à un niveau élevé à 60 jours (3,61 MPa). Cela traduit un effet

physique du marbre, qui augmente la densité de la pâte sans contribution chimique significative, comme l'ont indiqué Meddah et al. (2014) [5].

Le mélange M4 (brique seule) a affiché la résistance la plus élevée à 60 jours (3,91 MPa), mettant en évidence l'activité pouzzolanique de la brique, résultant de la réaction du  $\text{SiO}_2$  et de l' $\text{Al}_2\text{O}_3$  avec le  $\text{Ca(OH)}_2$ , renforçant ainsi la matrice cimentaire, comme l'ont montré Rahhal et al. (2012) [6]. qui ont confirmé l'amélioration mécanique du ciment après 28 jours.

Le mélange M10 (céramique seule) a présenté une bonne résistance initiale (3,39 MPa à 7 jours), mais celle-ci a diminué avec le temps pour atteindre 2,34 MPa à 60 jours, ce qui reflète l'inertie chimique de la céramique et sa faible contribution à long terme.

En revanche, les mélanges binaires combinant deux types de déchets avec des proportions variables ont, dans l'ensemble, présenté des performances inférieures à certains mélanges simples, tant en termes de résistance maximale qu'en termes d'évolution dans le temps. Cette baisse relative peut être attribuée à une interaction déséquilibrée entre les constituants ou à un manque d'homogénéité dans la distribution granulométrique, ce qui nuit à la microstructure et à la cohésion globale. Cela montre que la combinaison de deux matériaux ne garantit pas nécessairement une amélioration des performances, à moins qu'une complémentarité claire de leurs propriétés physiques et chimiques soit assurée.

En revanche, le mélange ternaire M6 (avec 6,6 % de chaque type de déchet : marbre, brique et céramique) a montré des performances relativement équilibrées aux différents âges (3,16 → 2,11 → 2,81 MPa). Cela est dû à une meilleure distribution granulométrique et à un certain équilibre dans les interactions physiques et chimiques, en accord avec les conclusions de Belouadah (2018) [7], qui a souligné que les formulations ternaires permettent d'améliorer la microstructure du ciment et de réduire les fissures dues au retrait..

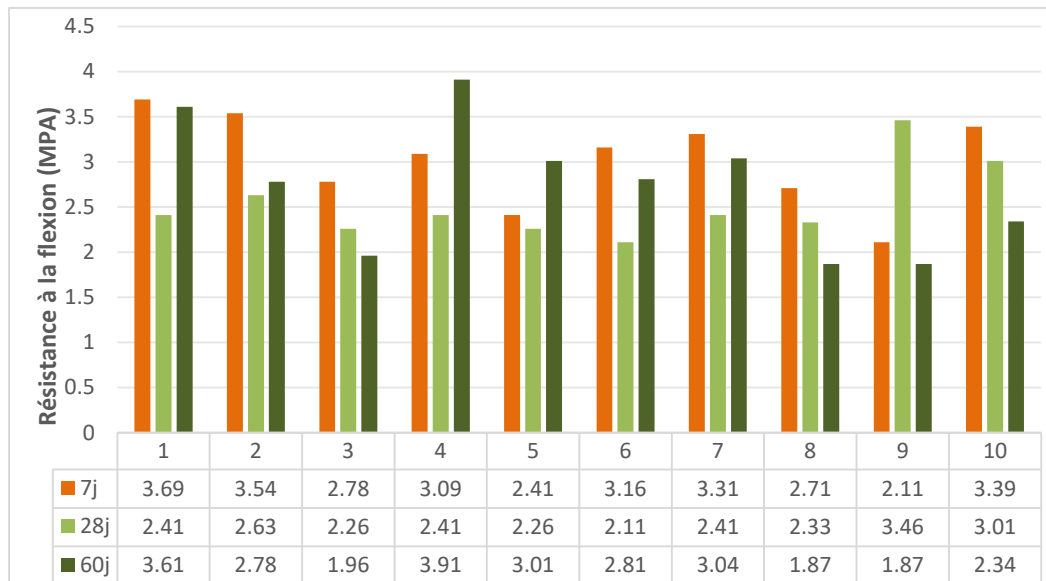


figure III 2 : Résultats de résistance à la flexion

### III.2.3. Résultats d'essai d'absorption immersion

Les valeurs d'absorption par immersion des différentes formulations varient entre 7,75 % et 8,5 %, ce qui indique une certaine proximité des résultats et suggère que la majorité des mélanges présentent des propriétés physiques relativement similaires en termes de porosité et de perméabilité (Neville, 2011). Cette proximité témoigne que l'incorporation des déchets ne compromet pas significativement la durabilité des matrices cimentaires.

Pour les mélanges à un seul type de déchet, une tendance décroissante des performances en termes d'absorption est observée dans l'ordre suivant : M1, M10 puis M4. Cette meilleure performance de M1 s'explique par les caractéristiques intrinsèques du marbre, connu pour sa faible porosité, ce qui limite efficacement la pénétration de l'eau (Mehta & Monteiro, 2014) [8]. La céramique, utilisée dans M10, présente une porosité modérée, entraînant une absorption intermédiaire. En revanche, la brique dans M4, avec sa porosité relativement élevée, montre une efficacité moindre face à la résistance à l'absorption d'eau (Kheder et al., 2003) [9].

En ce qui concerne les mélanges binaires, les résultats dépendent étroitement des types et proportions des déchets incorporés. Le mélange M8 (marbre + céramique) présente la plus faible absorption, témoignant d'une bonne synergie entre ces deux matériaux pour réduire la porosité globale. À l'inverse, les mélanges M2 et M9 affichent les taux d'absorption les plus élevés, ce qui pourrait être attribué à l'effet négatif de la brique, particulièrement lorsqu'elle

est associée à la céramique. D'autres combinaisons telles que M3 et M7 montrent des comportements intermédiaires, reflétant un équilibre relatif entre les effets physiques et chimiques. Quant au mélange M5, enrichi en marbre, il n'a pas atteint les performances attendues, ce qui pourrait s'expliquer par une distribution granulaire non optimale ou une interaction physico-chimique moins homogène. Ces observations corroborent les travaux précédents sur l'influence des matériaux recyclés sur la porosité et la capacité d'absorption dans les mélanges cimentaires (Medina et al., 2017 ; Siddique, 2008) [10].

Enfin, le mélange ternaire M6, avec un remplacement équilibré de chaque type de déchet, affiche une absorption modérée à relativement élevée. Ce comportement traduit l'influence combinée et équilibrée des trois matériaux : le marbre tend à réduire l'absorption, tandis que la céramique et la brique contribuent à l'augmenter.

Malgré la faible variation des valeurs d'absorption entre les formulations, certaines compositions montrent une meilleure résistance à la pénétration de l'eau. Cela souligne l'importance de l'optimisation des proportions des matériaux recyclés afin d'améliorer significativement la durabilité des bétons, notamment dans des environnements exposés à l'humidité ou à la pénétration d'eau (Neville, 2011). Une meilleure homogénéité du mélange et une distribution granulométrique optimisée peuvent réduire la porosité et ainsi limiter l'absorption d'eau, renforçant la performance à long terme des matériaux cimentaires.

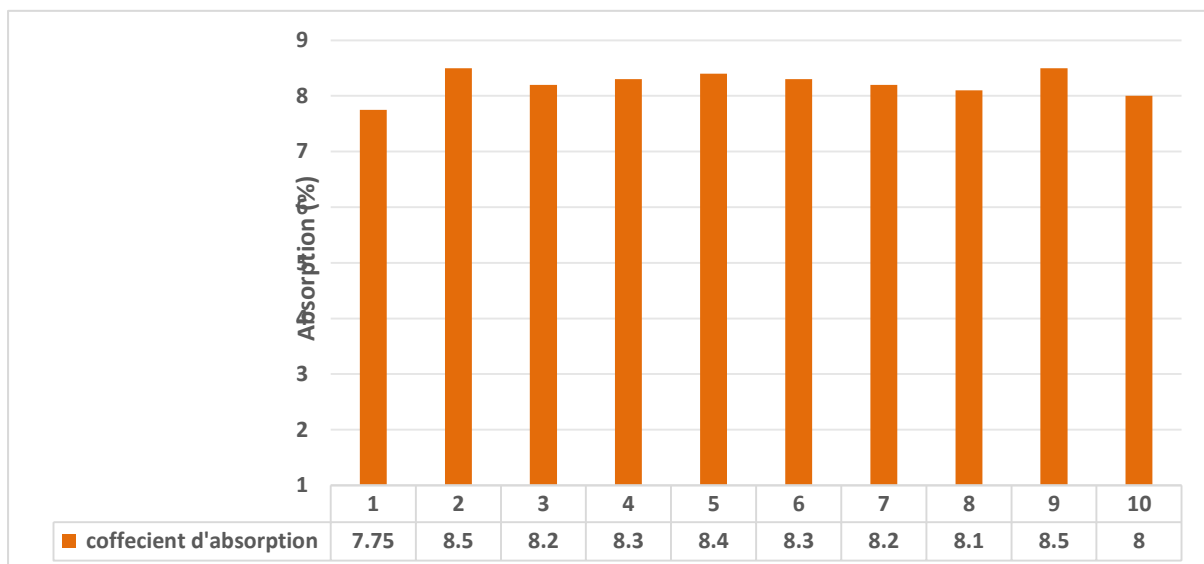


figure III 3 :Résultats d'essai d'absorption immersion

#### III.2.4. Résultats d'essai d'absorption capillaire

L'évolution du coefficient de sorptivité pour les dix formulations (M1 à M10) a été suivie de 5 minutes jusqu'à 72 heures. Les résultats révèlent des différences notables dans la cinétique d'absorption entre les mélanges.

Dans les premières minutes (5 à 30 min), les mélanges M4, M9 et M10 affichent les valeurs les plus faibles, indiquant une progression lente de l'absorption. À l'inverse, les mélanges M6, M7 et M2 montrent une montée plus rapide dès les premières étapes.

Entre 1 h et 7 h, tous les mélanges connaissent une augmentation continue. Les formulations M6, M7 et M8 atteignent des valeurs supérieures à  $2,5 \text{ g/m}^2/\text{s}^{0,5}$  après 7 h, contre environ  $2,1 \text{ g/m}^2/\text{s}^{0,5}$  pour M1 et M4.

À 24 h, les valeurs varient entre 6,4 et 7,5, avec M8 et M7 en tête. Enfin, à 72 h, les mélanges M7 et M8 présentent les sorptivités les plus élevées ( $\approx 13,05$ ), tandis que M1, M4 et M10 restent en dessous de 12.

Cette évolution traduit une différence dans le comportement d'absorption capillaire à court, moyen et long terme entre les formulations, soulignant l'importance de la nature et de la combinaison des déchets utilisés.

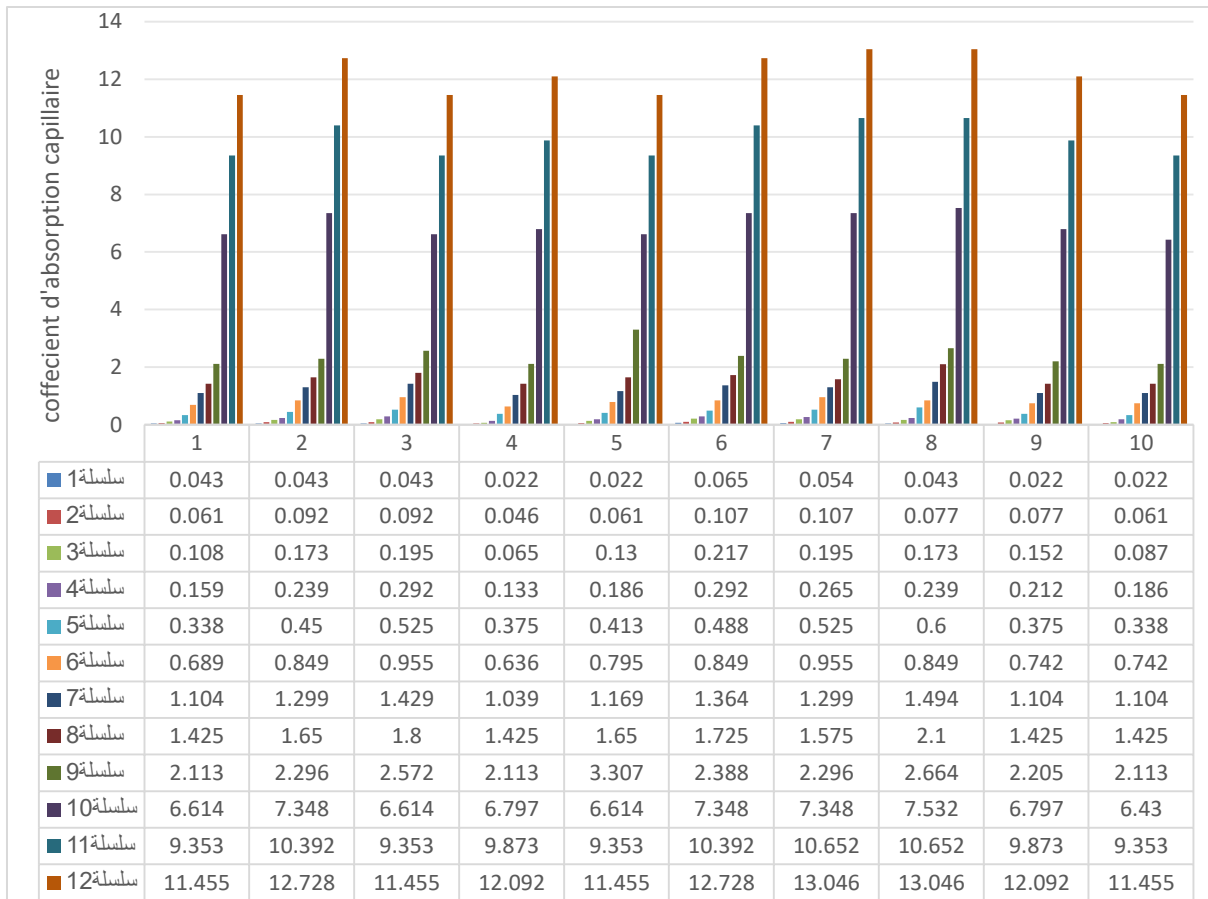


figure III 4 : Résultats d'essai d'absorption capillaire

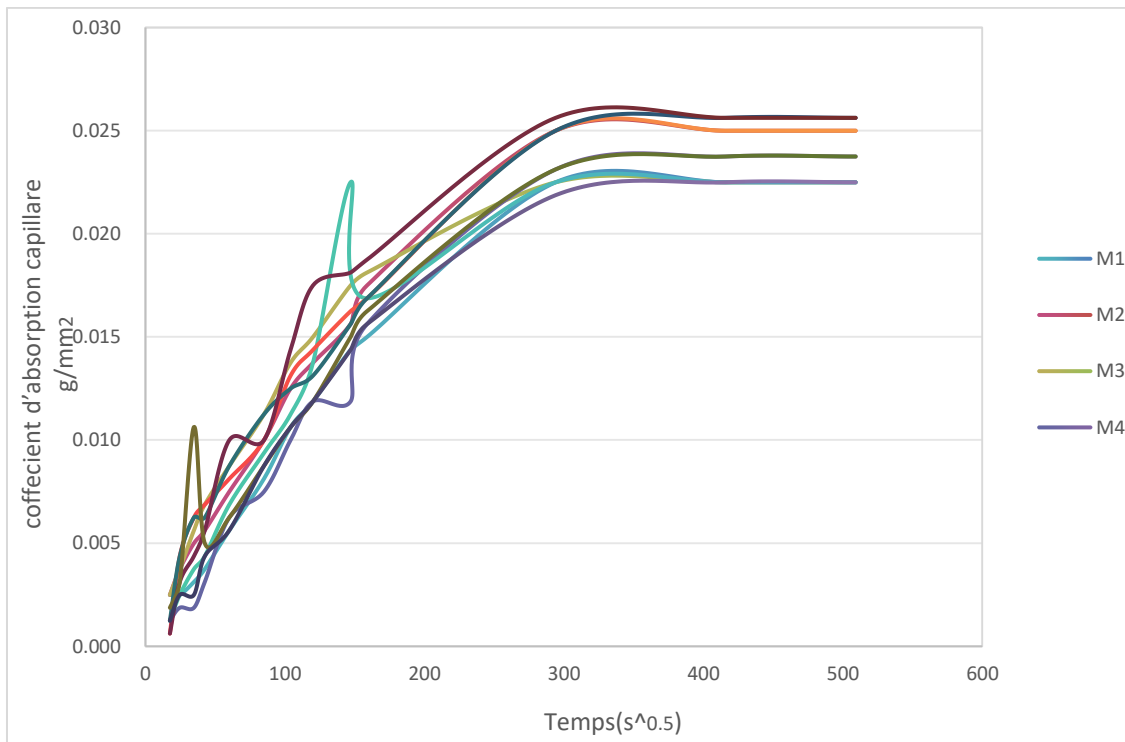


figure III 5 : Absorption d'eau capillaire par unité de surface de mortier

### III.3. Résultats Modélisation statistique

Afin d'étudier la répartition optimale des mélanges ternaires composés de poudre de marbre, poudre de brique et poudre de céramique comme substituts partiels au ciment, un plan expérimental en réseau (ou *lattice design*) a été mis en œuvre.

Ce plan permet de modéliser les interactions entre les différents composants du mélange à l'aide d'équations polynomiales de second ordre. Les essais mécaniques réalisés sur les mortiers élaborés à partir de ces combinaisons ont permis d'évaluer la résistance à la compression et la résistance à la flexion à 07 jours. Les modèles statistiques ajustés présentent des coefficients de détermination ( $R^2$ ) respectivement de 0,80 pour la résistance à la compression et de 0,81 pour la résistance à la flexion, indiquant une bonne capacité prédictive des équations obtenues.

En complément, l'analyse des erreurs montre une racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) de 0,77 MPa pour la flexion et de 5,09 MPa pour la compression, comparées à des valeurs moyennes expérimentales de 2,77 MPa et 15,34 MPa respectivement, sur un ensemble de dix observations. Ces résultats témoignent de la fiabilité du modèle pour représenter l'influence conjointe des trois ajouts minéraux sur les performances mécaniques des mortiers. Ce type d'approche basée sur les plans de mélange permet ainsi de déterminer la composition optimale minimisant la quantité de ciment tout en conservant des propriétés mécaniques satisfaisantes, contribuant ainsi à la valorisation des déchets et à la réduction de l'empreinte carbone dans les matériaux de construction.

**tableau III 1 : résumé de l'ajustement**

R carré	0.807404	0.814611
R carré ajusté	0.566666	0.582874
Racine de l'erreur quadratique moyenne	0.776108	5.09354
Moyenne de la réponse	2.2795	15.342
Observations (ou sommes pondérées)	10	10

L'analyse de la variance (ANOVA) a été effectuée dans le but d'évaluer la significativité statistique des modèles polynomiaux de second ordre développés pour prédire les résistances mécaniques (compression et flexion) des mortiers ternaires élaborés à partir de déchets inertes (poudre de marbre, poudre de brique et poudre de céramique) utilisés comme substituts partiels au ciment.

Le plan de mélange appliqué repose sur une répartition structurée des compositions selon un réseau complet, permettant d'examiner l'influence individuelle et interactive de chacun des constituants.

Le modèle statistique comprend  $p = 6$  paramètres, ce qui conduit à un degré de liberté pour le modèle égal à  $ddl_1 = p - 1 = 5$ , et un degré de liberté pour l'erreur résiduelle égal à  $ddl_2 = n - p = 4$ , où  $n = 10$  est le nombre total d'observations expérimentales.

Sous un niveau de confiance de 95 %, les valeurs de F calculées pour la résistance à la compression et la résistance à la flexion se sont révélées largement supérieures aux valeurs critiques extraites des tables de Fisher-Snedecor, ce qui permet de rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle les coefficients du modèle seraient tous égaux à zéro.

Ce résultat indique que les variations observées dans les réponses mécaniques ne sont pas dues au hasard mais sont bien expliquées par la structure du modèle établi. Par conséquent, les équations issues de la régression polynomiale sont statistiquement significatives et fiables pour représenter et prédire les performances mécaniques des mortiers en fonction des proportions respectives des ajouts utilisés. La combinaison de coefficients de détermination élevés ( $R^2 > 0,80$ ) et de faibles valeurs de RMSE (0,77 MPa pour la flexion et 5,09 MPa pour la compression) renforce davantage cette conclusion, en assurant une bonne corrélation entre les données expérimentales et les valeurs prédites. En somme, cette approche méthodologique, couplant un plan de mélange rigoureux à une validation ANOVA approfondie, constitue un outil puissant pour l'optimisation rationnelle des formulations de mortier écologiques, en identifiant la combinaison ternaire la plus performante sur le plan mécanique tout en contribuant à la valorisation des déchets et à la réduction de la teneur en clinker dans les matériaux cimentaires.

**tableau III 2: analyse de l'ANOVA**

	Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
RF	Modèle	5	10.100648	2.02013	3.3538
	Erreur	4	2.409374	0.60234	Prob. > F
	Total non corrigé	9	12.510023		0.1322
Rc	Modèle	5	456.00054	91.2001	3.5152
	Erreur	4	103.77662	25.9442	<b>Prob. &gt; F</b>
	Total non corrigé	9	559.77716		0.04235

Les équations polynomiales de second ordre, issues du plan de mélange et ajustées aux données expérimentales, permettant de prédire les deux réponses mesurées – à savoir la résistance à la compression et la résistance à la flexion – sont présentées ci-dessous. Ces modèles tiennent compte des effets individuels ainsi que des interactions binaires entre les constituants du mélange (poudre de marbre, poudre de brique et poudre de céramique), offrant ainsi une représentation mathématique fiable du comportement mécanique des mortiers étudiés.

RF	RC
$3.4041428571 \cdot M$ $+ 2.7677142857 \cdot B$ $+ -0.101571429 \cdot C$ $+ M \cdot (B \cdot -0.443571429)$ $+ M \cdot (C \cdot 3.3910714286)$ $+ B \cdot (C \cdot 1.6617857143)$	$14.697714286 \cdot M$ $+ 21.314857143 \cdot B$ $+ 0.7691428571 \cdot C$ $+ M \cdot (B \cdot 10.812857143)$ $+ M \cdot (C \cdot 52.945714286)$ $+ B \cdot (C \cdot -8.292857143)$

La représentation graphique des valeurs expérimentales observées en fonction des valeurs prédites par le modèle est illustrée dans la Figure 1. Ce graphique permet d'évaluer visuellement la qualité de l'ajustement des modèles de prédiction pour les deux réponses mécaniques, et de vérifier la concordance entre les résultats expérimentaux et ceux estimés par les équations polynomiales. Une bonne dispersion des points autour de la droite d'égalité (y = x) témoigne de la justesse du modèle.

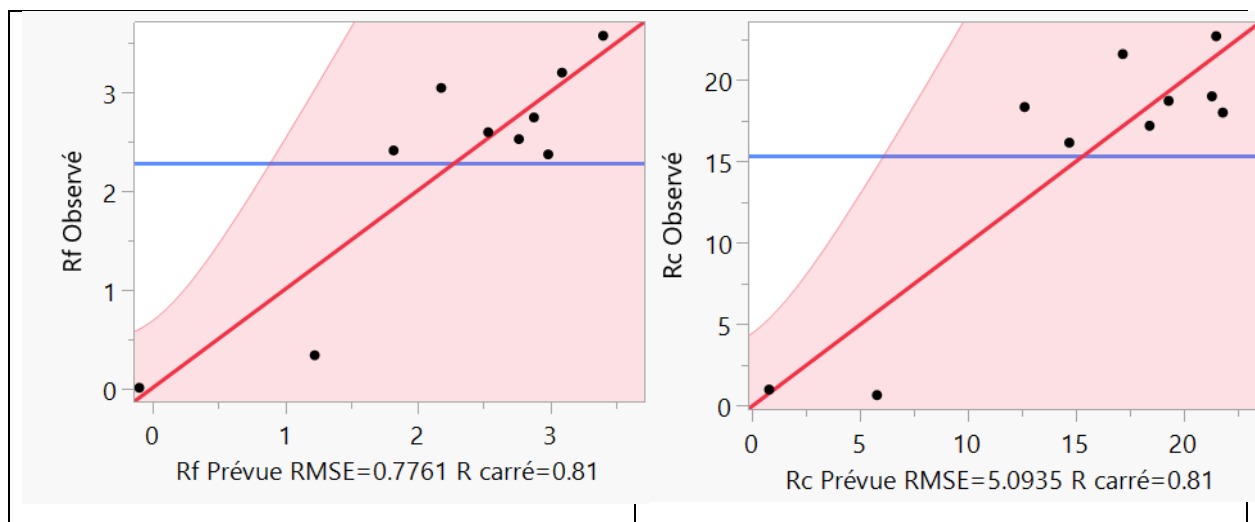


figure III 6 : Actual vs. Predicted Résistance a la compression et la résistance à la flexion a 28 jours

Le tableau ci-dessous présente une synthèse de l'effet des facteurs étudiés sur les réponses mécaniques, analysés à l'aide du test de Student. Ce test statistique permet de déterminer la significativité individuelle de chaque terme du modèle en comparant le rapport  $t_{i,ti}$  à une valeur critique  $t_{crit}$ , obtenue à partir de la distribution de Student pour un niveau de risque  $\alpha = 0,05$  et un degré de liberté  $ddl=n-p$ . Un effet est considéré comme statistiquement significatif si la valeur absolue de  $t_i$  dépasse  $t_{crit}$ , ou si la p-value correspondante est inférieure à 0,05.

Les résultats relatifs à la résistance à la flexion indiquent que la poudre de marbre et la poudre de brique ont un effet significatif, avec des p-values respectives de 0,0096 et 0,0193. L'effet de la poudre de brique peut être attribué à sa réactivité pouzzolanique, liée à sa teneur en silice amorphe et en alumine activables en milieu basique. Cette activité pouzzolanique favorise la formation de produits cimentaires secondaires tels que le C-S-H et le C-A-H, améliorant ainsi la cohésion de la matrice et la résistance mécanique, notamment à long terme. En revanche, la poudre de marbre, principalement composée de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), agit essentiellement par un effet physique de remplissage. Grâce à sa finesse, elle comble les vides entre les grains de ciment et les autres constituants, densifie la microstructure, et améliore le compactage et l'homogénéité de la matrice, ce qui peut contribuer à une meilleure transmission des efforts de flexion.

À l'inverse, la poudre de céramique n'a pas montré d'effet statistiquement significatif sur la résistance à la flexion (p-value = 0,089 > 0,05), ce qui peut être lié à sa moindre réactivité ou à une granulométrie moins favorable à l'effet de remplissage. De même, les termes d'interaction entre les trois constituants (marbre, brique et céramique) sont également non significatifs, suggérant une absence d'effet synergique notable dans les conditions étudiées.

Concernant la résistance à la compression, les conclusions sont similaires : les effets individuels de la poudre de marbre ( $p = 0,0347$ ) et de la poudre de brique ( $p = 0,0113$ ) sont significatifs, tandis que la poudre de céramique et les interactions ternaires ne le sont pas. Ces observations confirment que l'amélioration des propriétés mécaniques observée est principalement liée à la combinaison de l'effet pouzzolanique du déchet de brique et de l'effet de compacité induit par la poudre de marbre, deux mécanismes physico-chimiques complémentaires favorisant la performance globale du mortier.

tableau III 3: test de student

	Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. >  t	
Rf	M(Mélange)	3.4041429	0.730414	4.66	0.0096*	†
	B(Mélange)	2.7677143	0.730414	3.79	0.0193*	†
	C(Mélange)	-0.101571	0.730414	-0.14	0.8961	†
	M*B	-0.443571	3.233414	-0.14	0.8975	
	M*C	3.3910714	3.233414	1.05	0.3535	
	B*C	1.6617857	3.233414	0.51	0.6344	
Rc	M(Mélange)	14.697714	4.793653	3.07	0.0374*	†
	B(Mélange)	21.314857	4.793653	4.45	0.0113*	†
	C(Mélange)	0.7691429	4.793653	0.16	0.8803	†
	M*B	10.812857	21.22066	0.51	0.6372	
	M*C	52.945714	21.22066	2.50	0.0671	
	B*C	-8.292857	21.22066	-0.39	0.7159	

L'analyse des courbes de réponse relatives à la résistance à la compression (Rc) et à la résistance à la flexion (Rf) met en évidence des effets différenciés selon la nature des ajouts minéraux étudiés. La poudre de brique (B) présente un comportement caractéristique d'un matériau à réactivité pouzzolanique notable. Sa richesse en phases amorphes silico-alumineuses issues du traitement thermique initial favorise, en présence de la portlandite issue de l'hydratation du ciment, la formation secondaire de gels de type C-S-H et C-A-S-H, contribuant significativement à l'amélioration des propriétés mécaniques, notamment dans les plages de dosage intermédiaire (30 à 40 %). En parallèle, la poudre de marbre (M), constituée majoritairement de carbonate de calcium à faible réactivité hydraulique, agit principalement par un effet de compacité : sa finesse permet un meilleur remplissage de la matrice, réduisant la porosité capillaire, favorisant la nucléation de produits d'hydratation, et menant à un raffinement microstructural propice à une augmentation modérée mais stable des résistances mécaniques. En revanche, la poudre de céramique (C), bien que d'origine argileuse et potentiellement réactive, n'a pas démontré d'effet statistiquement significatif dans les plages de dosage testées. Ceci pourrait s'expliquer par une cristallinité élevée ou une faible activité pouzzolanique résiduelle, limitant son interaction avec la portlandite. Par ailleurs, les intervalles de confiance larges et la faible pente des courbes associées à cet ajout confirment son rôle neutre dans les performances observées. Ainsi, la synergie entre l'activité pouzzolanique de la poudre de brique et l'effet de compacité de la poudre de marbre constitue un levier d'optimisation microstructurale pertinent pour le développement de formulations à base de liants alternatifs à faible empreinte environnementale.

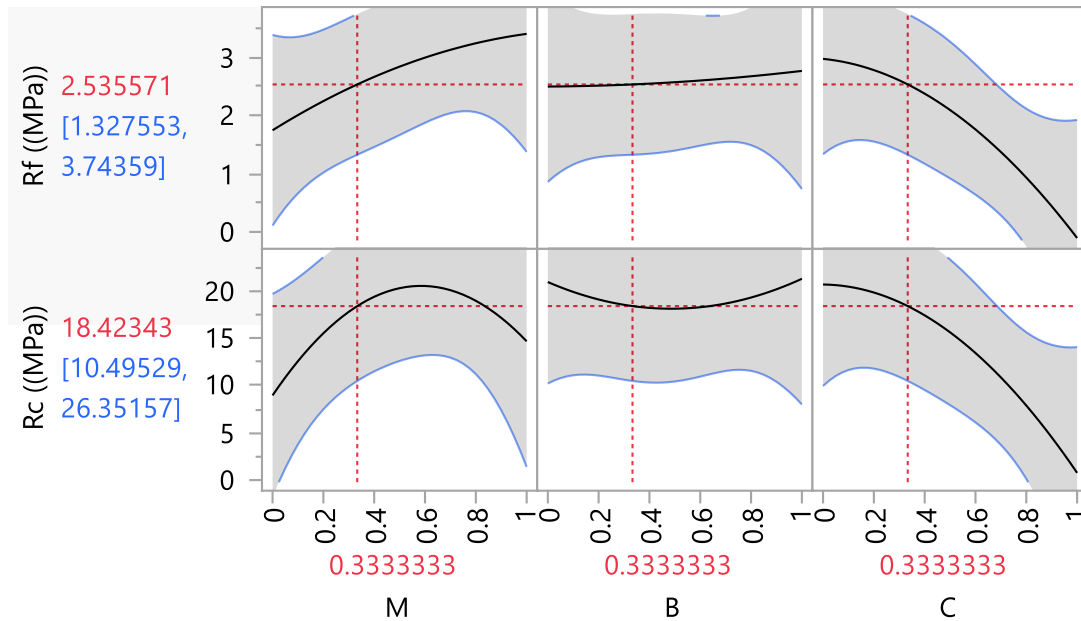


figure III 7: INFLEUNCE DES FACTEURS ETUDIÉ

La figure ci-dessous présente les courbes isoréponses relatives aux deux modèles mathématiques validés, à savoir ceux de la résistance à la compression et à la flexion. Cette méthode nous a permis de mieux visualiser l'influence simultanée des paramètres étudiés et d'identifier les combinaisons optimales permettant d'améliorer les performances mécaniques des mortiers.

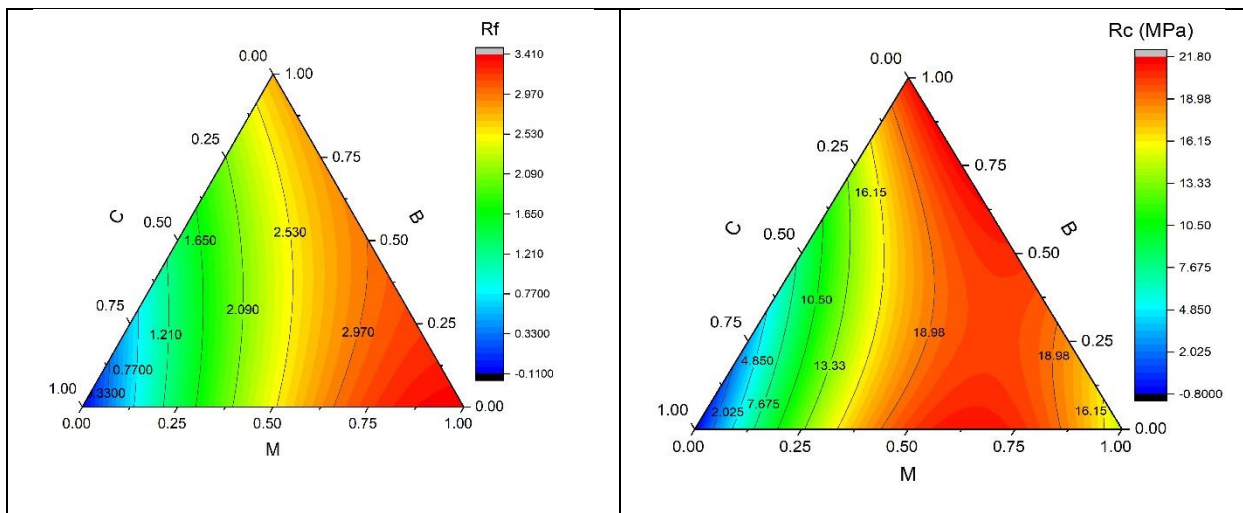


figure III 8: iso réponse la résistance à la compression (Rc) et à la résistance à la flexion (Rf)

# Conclusion générale

### Conclusion général

Dans le cadre de ce travail, nous avons exploré la possibilité de substituer partiellement le ciment par des déchets inertes tels que le marbre, la brique et la céramique. Cette approche ouvre la voie à une valorisation plus large de déchets locaux dans le secteur de la construction, tout en contribuant à la réduction de l'impact environnemental.

Les résultats obtenus ont montré que certaines combinaisons permettent d'améliorer ou de maintenir des performances mécaniques et de durabilité acceptables, offrant un bon compromis entre la résistance à la compression et l'absorption d'eau. L'analyse statistique a permis d'identifier les formulations les plus efficaces.

Ce type d'approche pourrait être approfondi à travers d'autres études portant sur le comportement à long terme des matériaux, l'effet de conditions environnementales variables, ou encore l'intégration d'autres types de déchets industriels dans la fabrication du ciment.

## Référence

### Référence chapitre I :

1. <http://forum-btp.blogspot.com/2013/09/les-mortiers.html>
2. Bouali Kh, (2014), Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de brique réfractaires ,Université M'hamed Bougara \_Boumerdes ,diplôme de magister ,P18,19,35,43
3. Toufik B ,(Mai 2017), matériaux de construction 01 ,centre universitaire de Tissemsilt , P 47,48
4. Cimbéton. Les constituants des bétons et des mortiers – Fiches techniques, Tome 1. Collection Technique CIMBÉTON G10, France, [s.d.].
5. Logbi A ,(2019), effet des ajouts minéraux actifs et inertes sur les propriétés physique ,mécanique et chimique du mortier ,Université Kasdi Merbah \_Ourgla , diplôme doctorat en science en génie civil,
6. R. DUPAIN, R. LANCHON, J-C. SAINT-ARROMAN <<Granulat, sols, ciment et béton>>
7. Ben Salah H, (2022), Etudes des propriétés physico-mécaniques et durabilité d'un béton de sable à haute performance : expérimentation et statistique ,Université Mohamed khider\_Beskra ,thèse diplôme Doctorat en sciences, P9
8. Barkat A, (2006) , valorisation des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton, Université Kasdi Merbah \_Ourgla , diplôme de magister
9. Meklid A, (2011), étude de la transition de phase de la solution solide de céramique piézoélectrique dans le system ternaire , Université de Kasdi Merbah Ouargla, thèse diplôme de magistère en chimie
10. Zeghichi, L., Mezghiche, B., & Benghazi, Z. (2012). Contribution à l'étude des propriétés du ciment blanc et composé. Communication Science & Technologie, OSTC N°10, 27–35.
11. Banni, R. (2011). Effet des ajouts minéraux actifs et adjuvant fluidifiant sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons et leurs méthodes de formulation de mélange [Mémoire de magistère, Université Mohamed Khider Biskra].
12. BOUGLADA Mohammed Salah. Caractérisation physico-chimique et microstructurale des ajouts minéraux. Thèse de Doctorat en Sciences, Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd, avril 2019,P,65,66,103.

## référence

---

13. Bouhklhel A, (2019), comportement physico-mécaniques et durabilité en climat chaud des mortiers auto plaçants a base d'ajouts binaires et ternaires ,université Ammar Telidji de Laghouat, Thèse de Doctorat ,P 53,73 ,8820:38
14. ABDOU,Y, (2018), Influence de l'ajout de déchets de céramique broyés sur les performances des mortiers à base de sable de dune, Thèse de doctorat en science, École Nationale Polytechnique, Département de Génie Civil, Laboratoire Matériaux,
15. Boukour S, (2017), caractéristique physico\_mécaniques et durabilité des éco\_composites cimentaires à base de granulate de caoutchouc issus de pneus usagès , université 8 Mai 1945 \_Guelma ,diplôme de Doctorat , P 13
16. Kotb, O. B. (2019). Marble in Islamic Maghreb and AL-Andalus الرخام في بلاد المغرب والأندلس. مجلة قطاع الدراسات الإنسانية Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/366824890>
17. Lamothe, S. (2010). Étude de l'influence de la granulométrie des granulats sur les propriétés des enrobés bitumineux [Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure].
18. Ahmidi, S. (s.d.). Modélisation de l'efficacité des additions minérales entre les propriétés mécanique et de durabilité par le concept du liant équivalent [Mémoire de Magister, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef]. Faculté de Génie civil et d'Architecture.
19. Harbi, R. (2018). Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers avec additions minérales [Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 Guelma, Faculté des sciences et de la technologie, Département de génie civil et hydraulique].
20. Alemu, M. Y., Yehualaw, M. D., Nebiyu, W. M., Nebebe, M. D., & Taffese, W. Z. (2025). Marble and glass waste powder in cement mortar. Applied Sciences, 15(3930). <https://doi.org/10.3390/app15073930> (pp. 11–12).
21. Benouis, A., & Bechiri, F. (2011). Évolution des résistances des mortiers aux hautes températures: Effet de la nature du sable. XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil, Tlemcen, 29–31 mai 2011. Université de Guelma.
22. Votre Constructeur de Maison. (s.d.). Dosage optimal pour un mortier bâtard réussi : proportions et astuces. <https://votreconstructeurdemaison.fr/dosage-optimal-pour-un-mortier-batard-reussi-proportions-et-astuces>
23. Taylor, H. F. W. (2003). Cement chemistry (2nd ed.). Thomas Telford Publishing.
24. ALPA Powder Technology. (بدون تاريخ). إعادة تدوير مواد النفايات السيراميكية. <https://www.alpapowder.com/ar/131418/>

## référence

---

25. Chaux Michel Boehm. (n.d.). Charges minérales. <http://chauxboehm.fr/produits-deco/charges-minerales/>
26. Pikbest. (n.d.). Marbre gris beauté préservée le blanc et la surface non traités de la roche dans son environnement naturel. [https://fr.pikbest.com/backgrounds/marble-gray-unspoiled-beauty-the-rock-s-untreated-white-and-surface-in-its-natural-environment\\_9923459.html](https://fr.pikbest.com/backgrounds/marble-gray-unspoiled-beauty-the-rock-s-untreated-white-and-surface-in-its-natural-environment_9923459.html)
27. DJEBRI, F.S.a.L., Etude comparative entre les mortiers renforcés avec la fibre métallique et verre. UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ de Bouira, 2019

### Référence chapitre II :

1. AFNOR. (1990). NF P 18-560 : Analyse granulométrique par tamisage. *Association Française de Normalisation*.
2. AFNOR. (1997). XP P 18-540 : Granulats — Définitions, conformité, spécifications. *Association Française de Normalisation*.
3. AFNOR. (1990). NF P 18-555 : Granulats — Mesure des masses volumiques, coefficient d'absorption et de la teneur en eau des sables. *Association Française de Normalisation*
4. [4] AFNOR. (1991). NF P 18-598 : Équivalent de sable. *Association Française de Normalisation*.
5. <https://www.stde.fr/ciments-mortiers/preparation-des-echantillons/moules-pour-mortier-et-ciment/moule-a-3-alveoles-40-x-40-x-160-mm/>
6. AFNOR. (1995). NF EN 196-1 : Méthodes d'essai des ciments — Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques. *Association Française de Normalisation*.
7. Boukour, S. (2017). Caractéristiques physico-mécaniques et durabilité des éco-composites cimentaires à base de granulats de caoutchouc issus de pneus usagés [Thèse de doctorat, Université du 08 Mai 1945 - Guelma].
8. Belouadah, M. (2018). Étude de l'influence de la nature des fillers sur les propriétés des bétons à base de matériaux locaux à l'état frais et à l'état durci et soumis aux hautes températures [Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf - M'Sila].
9. Harbi, R. (2018). Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers avec additions minérales [Thèse de doctorat, Université du 8 Mai 1945 - Guelma].
10. Felkaoui, N. (2024). Étude de l'influence des fillers de calcaire, de marbre et de pouzzolane naturelle sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers

:Application de la méthode du plan de mélange [*Mémoire de master, Université Ferhat Abbas Sétif 1*].

### Référence chapitre III :

1. Harbi, R. (2018). Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers avec additions minérales [Thèse de doctorat, Université du 8 Mai 1945 - Guelma]
2. Boukour, S. (2017). Caractéristiques physico-mécaniques et durabilité des éco-composites cimentaires à base de granulats de caoutchouc issus de pneus usagés [Thèse de doctorat, Université du 8 Mai 1945 - Guelma].
3. Belouadah, M. (2018). Étude de l'influence de la nature des fillers sur les propriétés des bétons à base de matériaux locaux à l'état frais et durci et soumis aux hautes températures [Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf - M'Sila].
4. Felkaoui, N. (2024). Étude de l'influence des fillers de calcaire, de marbre et de pouzzolane naturelle sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers : Application de la méthode du plan de mélange [*Mémoire de Master, Université Ferhat Abbas Sétif 1*].
5. Rahhal, V., & Talero, R. (2012). Pozzolanic activity of ceramic waste evaluated by electrical conductivity. *Construction and Building Materials*, 31, 288–292.
6. Meddah, M. S., & Tagnit-Hamou, A. (2014). Use of marble powder as filler substitute in cementitious systems. *Cement and Concrete Composites*, 46, 96–104.
7. Safi, B., Saidi, M., Aboutaleb, D., & Maallemi, A. (2015). The use of ceramic waste aggregates in concrete: A literary review. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 6(1), 46–55.
8. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education. Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited. Siddique, R. (2008). *Waste materials and by-products in concrete*. Springer.
9. Kheder, G. F., Al-Windawi, S. A., & Al-Attar, M. M. (2003). A concrete made with ceramic sanitary ware waste. *Materials and Structures*, 36(7), 404–410
10. Medina, G., Sáez del Bosque, I. F., Frías, M., & Sánchez de Rojas, M. I. (2017). Sustainable use of ceramic wastes in concrete production. *Construction and Building Materials*, 148, 419–428.

# Annexes

# البسكرة للإسمنت



## بطاقة تقنية



### CEM I 42.5N SR3 LH إسمنت بورتلاند مقاوم للكبريتات ذو حرارة إمالة منخفضة



إسمنت رمادي مقاوم للكبريتات ذو حرارة إمالة منخفضة (LH) لجميع أشغالكم في بيئة ذات نسب عالية من الكبريتات، مناسب أيضا لأشغال الخرسانة الضخمة و المستمرة في الطقس الحار الذي يتطلب إسمنت بأقل حرارة إتبعات.

CEM I 42.5N SR3 LH

مطابق للمعايير الجزائرية (NA442-2013).

## مجالات الإستعمال



إسمنت لجميع أعمال البناء التي تتطلب مقاومة عالية، في البيئة العدوانية، للأشغال في البحر، يمكن الإعتماد عليه طول السنة، كما يوصى به أيضا للإستخدامات التالية:

- الخرسانة المسلحة في البيئات العدوانية: مياه البحر، مياه ذو قاعدة حمضية، عضية أو صناعية.
- مشاريع البناء الضخمة (جسور، سدود، جدران إستنادية...)
- خرسانة الطرق: الخرسانة الإنشائية لحواجز الأمان و المزارب الإسمنتية.
- خرسانة محطات معالجة مياه الصرف الصحي.
- خرسانة البيئات المالحة.

## مناسب لـ



- محطات و أحواض تحلية المياه.
- البيئة البحرية.
- البناءات الزراعية.
- أعمال الأساسات الخرسانية الضخمة.
- الأشغال في البيئة ذات التركيز العالي من الكلوريدات و الكبريتيدات.



تم تصميم و تصنيع المنتج في إطار نظام إدارة الجودة المعتمد من AFAQ-AFNOR وفق المواصفة القياسية ISO 9001.



## الصياغة الموصى بها



الرمول sable	الخرسانة C25	الخرسانة C30	الخرسانة C35	نسبة الإسمنت في الخرسانة
1 X 50 حلو	7 X 20	4 X 15 + 5 X 20	25 م	
الرمول sable	الخرسانة C30	الخرسانة C35	الخرسانة C40	ملاط للقبولية
1 X 50 حلو	6 X 20	9 X 15	35 م	
الرمول sable	الخرسانة C30	الخرسانة C35	الخرسانة C40	ملاط التشطيبات
1 X 50 حلو	9 X 20	6 X 15	35 م	

ملاحظة: دلو = 10 لترات

## الخصائص التقنية



القيمة	مقاومة الضغط
18	يومان (MPa)
54	28 يوم (MPa)



القيمة	التحليل الكيميائية (%)
< 3	خسارة بالاشتعال
2.8 - 2.2	محتوى الكبريت (SO <sub>3</sub> )
< 3.5	محتوى أكسيد المغنيزيوم (MgO)
< 0.04	محتوى الكلوريد (Cl <sup>-</sup> )
≤ 0.75	بقايا غير قابلة للذوبان
القيمة	التركيب المحتمل للكلنكر (%) (وفقاً لـ EN 12607)
60	C3B
< 3	C3A
< 20	C4AF + 2 C3A
القيمة	الخصائص الفيزيائية
26.5	إلى تساق القياسي (%)
< 1	التمدد الجاف (مم)
القيمة	زمن التماسك
180	بداية التماسك
320	نهاية التماسك

## تعليمات الأمان



إحمي بشرتك:

يجب عليك ارتداء معدات الحماية قبل التعامل لمواقع البناء و هي:



حماية الرأس | حذاء الواقي | وقاية الأذن | القفازات | النظارات الواقية | الحودة



Djar Belahroche, Branis, Biskra, Algérie

www.biskriaciment-dz.com

Tel: (+213) 0560 753 424

contact@biskriaciment-dz.com

Fax: (+213) 033 62 73 82