

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة 20 أوت 1955 - سكيكدة

UNIVERSITE 20 AOÛT 1955- SIKKDA



Faculté de Technologie  
Département de Génie Civil  
Spécialité : Matériaux en génie civil  
Mémoire présenté en vue de l'obtention d'un  
Master en génie civil

# Thème

**Effets du remplacement partiel d'un ciment par les  
cendres « étude d'un mortier »**

Présenté Par : BOUAKKADA Nadir

Soutenu le 29/06/2024

Devant le Jury:

MOUATS Wassila	MCA	Président	Université 20 août 1955- Skikda
HEBHOUB Houria	Professeur	Examinatrice	Université 20 août 1955- Skikda
BOUGHAMSA Wassila	MCA	Encadreur	Université 20 août 1955- Skikda
LEKOUI Abdelghani	Doctorant	Invité	Université 20 août 1955- Skikda

Promotion 2023/2024

## SOMMAIRE

dédicace .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Résumé .....	6
Introduction Générale.....	10
Organisation du mémoire .....	10
.....	11
1.1. Introduction .....	12
2.1. Les mortiers .....	12
1.2.1. Constituants des mortiers .....	12
1.2.1.1. Le premier constituant clé est le liant.....	12
1.2.1.2. Les agrégats fins constituent un autre élément essentiel.....	12
1.2.1.3. L'eau.....	13
1.2.3 Rôle et domaines d'utilisation de mortier .....	13
1.2.4 Classification des mortiers .....	14
Classification selon la composition.....	14
Classification selon la résistance.....	14
Classification selon l'application.....	14
Classification selon le temps de prise .....	14
1.2.5. Classement des mortiers en fonction des adjuvants utilisés:.....	15
Classe 1 : Modification des caractéristiques à l'état Frais.....	15
Classe 2 : Modification pendant la prise et le durcissement .....	15
Classe 3 : Modification de la Teneur en air ou en autres Gaz.....	15
Classe 4 : Modification de la Résistance.....	15
Classe 5 : Amélioration de la Durabilité .....	15
Classe 6 : Propriétés Spéciales .....	15
1.2.6. Préparation des mortiers .....	16
1.2.6.1. Dosage de mortiers.....	16
Tableau 1.1 dosage des mortiers.....	16
1.2.7. Les principales caractéristiques du mortier .....	16
1.2.7.1 Résistance à la compression.....	16
1.2.7.2 Résistance à la flexion.....	17
1.2.7.3 Adhérence.....	17
1.2.7.4 Ouvrabilité.....	17
1.2.7.5 Durcissement.....	17
1.2.7.6 Porosité.....	17

1.2.7.7 Densité.....	17
1.2.7.8 Conductivité thermique .....	17
1.2.7.9 Résistance à l'eau .....	17
1.2.7.10 Résistance au gel .....	17
1.2.7.11 Résistance aux produits chimiques .....	17
1.3 Historique sur l'utilisation de cendres dans le mortier .....	17
1.3.1. Le Moyen Âge et la redécouverte des cendres.....	18
1.3.2. L'ère industrielle et l'essor des cendres volantes.....	18
1.3.3 Avantages de l'utilisation des cendres dans le mortier .....	18
Chapitre 2 : Étude des propriétés des matériaux .....	20
2.1. Introduction .....	20
2.2 Étude des propriétés des matériaux .....	20
2.2.1. Sable de dune .....	20
2.2.1.a Analyse granulométrique.....	20
Tableau 2.1 Analyse granulométrique.....	20
Figure 2.1 Courbe granulométrique .....	21
2.2.1.b L'équivalent de sable .....	21
2.2.1.c La masse volumique .....	21
1. Masse volumique absolue .....	21
2. Masse volumique apparente .....	21
Figure 2.3 Masse volumique apparente du sable .....	22
2.2.2. Cendres de coquilles de noix.....	22
2.2.2. Masse volumique.....	23
Figure 1.3 La mesure de la masse des cendres .....	23
Figure 2.4 La mesure de la masse volumique absolue.....	24
Figure2.5 La mesure de la masse volumique .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2.2.3. Ciment .....	24
Figure 2.6 Sac de Ciment GICA .....	25
2.2.3.a Masse volumique apparente du ciment .....	25
Figure 2.7 Remplissage du cylindre .....	25
Figure 2.8 Nivellement .....	26
Figure 2.9 peser le cylindre rempli .....	26
Chapitre 3 : Le programme d'essai et la méthodologie de test.....	29
3.1 Introduction .....	29
3.2 Le programme d'essai.....	29
3.2.1 Le programme d'essai.....	29
Tableau 3.1 Données de l'étude .....	29

3.2.2 Le programme d'essais.....	29
3.2.2.1 La résistance en traction par flexion .....	29
3.2.2.2 La résistance en compression .....	30
3.2.2.3 L'absorption d'eau par immersion .....	30
3.2.2.4 L'absorption d'eau par capillarité .....	30
3.2.2.5 Attaques chimiques .....	30
3.2.2.6 Consistance.....	30
3.2.2.7 Masse volumique.....	30
3.3 formulations des mélanges .....	31
Tableau 3.2 Formulation des mélanges .....	31
3.1 Malaxage de mortier.....	31
Figure 3.1 malaxage.....	32
Figure 3.2 malaxage.....	32
<b>2.3</b> Préparation et remplissage des moules:.....	32
Figure 3.3 Remplissez les moules.....	33
3.3 La conservation des éprouvettes .....	33
Figure 3.4 la conservation des éprouvettes .....	34
3.4 démoulages des éprouvettes .....	34
Figure 3.5 démoulage des éprouvettes .....	34
3.4. Procédures d'essai.....	35
3.4.1 A l'état frais.....	35
a. la consistance.....	35
Figure 3.6 l'étalement .....	35
b. la masse volumique .....	36
3.4.2 A l'état durci.....	36
a. Résistance à la compression .....	36
Figure 3.9 essai de compression .....	37
Figure 3.9 essai de traction par flexion .....	38
c. Absorption par immersion .....	38
Figure 3.10 étuve .....	38
d. Absorption d'eau par capillarite .....	39
e. Essais de perte en masse due aux attaques chimiques.....	39
Figure 3.12 les attaques chimiques .....	40
3.5 Conclusion.....	40
Chapitre 4 : Résultats et discussions .....	42
4.1 Introduction .....	42
4.2 A l'état frais.....	42

4.2.1 La masse volumique .....	42
Tableau 4.1 résultats de la masse volumique.....	42
Figure 4.1 résultats de la masse volumique .....	43
<b>Figure 4.2</b> présente des données sur l'étalement du mortier en fonction du taux de substitution.....	44
4.3 A l'état durci.....	44
<b>Tableau 4.3</b> La résistance en traction par flexion en fonction de l'âge et du taux de substitution.....	44
<b>Figure 4.3</b> La résistance en traction par flexion en fonction de l'âge et du taux de substitution.....	45
4.3.2 La résistance en compression .....	45
<b>Tableau 4.4</b> La résistance en compression en fonction de l'âge et du taux de substitution	45
<b>Figure 4.4</b> La résistance en compression en fonction de l'âge et du taux de substitution	46
4.3.3 L'absorption d'eau par immersion .....	46
<b>Tableau 4.5</b> L'absorption d'eau par immersion en fonction du taux de substitution .....	46
<b>Figure 4.5</b> L'absorption d'eau par immersion en fonction du taux de substitution .....	47
4.3.4 absorptions d'eau par capillarité.....	47
<b>Tableau 4.6</b> absorption d'eau par capillarité en fonction de l'âge et du taux de substitution .....	47
Tableau 4.7 Coefficient de capillarité en fonction de l'âge et du taux de substitution.....	48
Figure 4.7 Coefficient de capillarite en fonction de l'âge et du taux de substitution .....	48
4.3.5 Les attaques chimiques.....	48
A- conservation dans l'acide sulfurique H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	48
Tableau 4.8 la perte en masse due aux attaques du H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> en fonction de l'âge et du taux de substitution.....	49
Figure 4.9 la perte en masse due au H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> en fonction de l'âge et du taux de substitution .....	49
Tableau 4.9 pourcentage de la perte de masse en fonction de l'âge et du taux de substitution .....	49
Figure4.10 : pourcentage de perte de masse en fonction de l'âge et du taux de substitution .....	50
B- conservation dans les chlorures de sodium NaCl.....	50
Tableau 4.11 : pourcentage de la perte de masse en fonction de l'âge et du taux de substitution.....	50
Figure4.12 : pourcentage de perte de masse en fonction de l'âge et du taux de substitution .....	51
4.3 Conclusion.....	51
Remerciements .....	56
Reference.....	58

# Dédicace

À nos chers parents,

**Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude envers vous pour votre soutien indéfectible tout au long de ce parcours académique. Votre encouragement constant et votre confiance en nos capacités ont été des sources d'inspiration inestimables. Chaque étape de ce mémoire a été rendue possible grâce à votre soutien affectueux et à vos sacrifices désintéressés. Votre présence et vos conseils avisés ont été des piliers essentiels qui ont renforcé notre détermination à atteindre nos objectifs académiques.**

À nos encadreurs, Dr. Boughamsa Wassila et Dr. Lekoui Tahar,

**Votre expertise et votre guidance attentive ont été cruciales dans la réalisation de ce mémoire. Votre soutien inlassable, votre patience et votre engagement envers notre développement académique ont enrichi cette expérience d'apprentissage de manière significative.**

**Dr. Boughamsa Wassila, votre approche méthodique et vos conseils éclairés ont éclairé chaque étape de notre recherche. Votre capacité à nous guider à travers les défis académiques a été d'une valeur inestimable.**

**Dr. Lekoui Tahar, votre soutien continu et vos encouragements chaleureux ont nourri notre passion pour notre domaine d'étude et ont renforcé notre conviction dans notre capacité à contribuer au savoir. Votre mentorat bienveillant a joué un rôle crucial dans notre développement intellectuel et professionnel.**

**Nous vous adressons nos plus sincères remerciements pour votre dévouement et votre contribution à notre réussite académique. Votre influence continuera à inspirer nos futurs projets et aspirations.**

## **Résumé**

L'étude explore l'utilisation de cendres de coquilles de noix comme matériau dans la fabrication de mortier dans une perspective de valorisation de déchets d'origine végétale.

Elle vise à évaluer les effets de l'incorporation de ces déchets dans le mortier sur ses propriétés physiques et mécaniques ainsi que sa capacité à résister aux attaques chimiques. Cette démarche s'inscrit dans une approche de valorisation des déchets et de réduction de l'empreinte environnementale.

L'étude examine trois formulations de mortier avec des taux d'incorporation de cendres de coquilles de noix à 6%, 8%, et 12%. Les résultats de l'étude fourniront des informations cruciales sur la viabilité et les avantages environnementaux de l'utilisation de cendres de coquilles de noix dans la composition de mortier, contribuant ainsi à des pratiques de construction plus durables et respectueuses de l'environnement.

## ملخص :

تستكشف الدراسة استخدام رماد قشور جوز الهند كمادة في صناعة الأسمنت من منظور استغلال النفايات البنائية. تهدف الدراسة إلى تقييم تأثير إدماج هذه النفايات في الأسمنت على خصائصه الفيزيائية والميكانيكية، بالإضافة إلى قدرته على مقاومة الهجمات الكيميائية. تأتي هذه الخطوة في سياق استغلال النفايات وتقليل الأثر البيئي. نفحص الدراسة ثالث صيغ للأسمنت بنسب إدماج لرماد قشور جوز الهند تبلغ 6%، 8%، و21%. ستقدم نتائج الدراسة معلومات حاسمة حول جدوى ووثوق استخدام رماد قشور جوز الهند في تركيب الأسمنت، مما يساهم في الممارسات البنائية المستدامة والحترامي للبيئة.

## **Abstract**

The study explores the use of walnut shell ashes as a material in mortar production from the perspective of valorizing plant waste. It aims to evaluate the effects of incorporating these wastes into mortar on its physical and mechanical properties, as well as its ability to resist chemical attacks. This approach is part of waste valorization and environmental footprint reduction. The study examines three mortar formulations with incorporation rates of walnut shell ashes at 6%, 8%, and 12%. The study results will provide crucial information on the feasibility and environmental benefits of using walnut shell ashes in mortar composition, thereby contributing to more sustainable and environmentally friendly construction practices.

# **Introduction Générale**

## **Introduction Générale**

Le mortier est un mélange de matériaux utilisé dans la construction pour lier un ensemble d'éléments tels que des briques, des pierres ou des blocs de béton. Il est composé principalement de ciment, de sable et d'eau. Le ciment agit comme liant, tandis que le sable fournit la masse et la texture nécessaires. L'eau est ajoutée pour activer la réaction chimique qui permet au mélange de durcir et de former une liaison solide entre les matériaux de construction. Le mortier est généralement utilisé pour fixer les briques et les pierres entre elles, formant ainsi des murs, des cheminées, des fondations et d'autres structures similaires. Il existe différents types de mortier adaptés à différentes applications, en fonction des exigences de résistance, de durabilité et d'esthétique.

L'étude comprend une comparaison de l'évolution de la résistance résiduelle en flexion et en compression simple, ainsi que la perte de masse due aux attaques chimiques, pour quatre formulations de mortier. Trois de ces formulations intègrent **des cendres de coquilles de noix** à des taux variant **entre 6%, 8%, et 12%** de la masse du ciment dans le mortier. La quatrième formulation servira comme référence (sans ajout).

### **Organisation du mémoire :**

Le mémoire couvre les chapitres suivants :

**Chapitre 1** : Les Cendres dans le Mortier

**Chapitre 2** : décrit les matériaux utilisés tels que le sable de dune et **cendres de coquilles de noix**, en mettant l'accent sur les propriétés physiques, chimiques, et les tests de caractérisation.

**Chapitre 3** : Le programme des essais à effectuer et leur méthodologie.

**Chapitre 4** : Évaluation des résultats

# **Chapitre I**

### 1.1. Introduction :

Dans ce chapitre, une recherche bibliographique est menée sur le mortier et les cendres de coques de noix, englobant les caractéristiques, les classifications, et les diverses utilisations de ces matériaux dans le domaine de la construction.

### 2.1. Les mortiers :

Mélange homogène de liant avec une proportion variable de sable et d'eau. Un Mortier est désigné par le nom du liant utilisé. Exemples : mortier de ciment, mortier de Chaux. Un mortier bâtard comporte au moins deux liants différents. Il est désigné par L'énumération de ses liants. Exemples : mortier de ciment-chaux, mortier de chaux plâtre. [1]

#### 1.2.1. Constituants des mortiers :

Les mortiers, éléments essentiels dans la construction, se composent de différents constituants qui déterminent leurs propriétés et leurs performances. Comprendre ces constituants est crucial pour garantir des applications efficaces et durables

##### 1.2.1.1. Le premier constituant clé est le liant :

Il s'agit d'un matériau qui confère à la pâte de mortier sa résistance et sa cohésion. Le ciment Portland est l'un des liants les plus couramment utilisés.

Fabriqué à partir de calcaire et d'argile, il durcit lorsqu'il réagit chimiquement avec l'eau pour former une matrice solide. La chaux hydraulique est une autre option de liant, offrant une meilleure perméabilité et une plus grande flexibilité que le ciment Portland. En outre, la terre peut également servir de liant dans certains mortiers, en particulier dans les techniques de construction traditionnelles.

##### 1.2.1.2. Les agrégats fins constituent un autre élément essentiel :

Le sable représente l'agrégat fin prédominant dans la formulation des mortiers en raison de ses propriétés uniques. Son utilisation est répandue en raison de sa granulométrie régulière et de sa texture, des caractéristiques qui influencent directement les performances du mortier.

En contrôlant la taille des particules et la distribution granulométrique du sable, il est possible d'optimiser la résistance, la plasticité et d'autres propriétés du mortier.

Outre le sable, d'autres matériaux peuvent également servir d'agrégats fins dans la composition des mortiers. Les poussières de pierre, par exemple, sont parfois utilisées pour leurs caractéristiques spécifiques.

Leur composition et leur granulométrie peuvent varier, offrant ainsi des propriétés distinctes au mortier. Certains types de poussières de pierre peuvent contribuer à améliorer la résistance et la durabilité du mortier, tandis que d'autres peuvent être choisis pour leur capacité à modifier la plasticité ou d'autres aspects du mélange.

Le choix de l'agrégat fin dépend des exigences spécifiques de chaque projet de construction. Les caractéristiques géologiques de la région, la disponibilité des matériaux et les performances requises du mortier sont des facteurs à prendre en compte dans cette décision. Par exemple, dans les zones où le sable est abondant et facilement accessible, il est souvent privilégié en raison de sa rentabilité et de ses performances bien connues.

Cependant, dans certaines circonstances, les poussières de pierre peuvent offrir des avantages particuliers, notamment en matière de résistance ou de plasticité.

### 1.2.1.3. L'eau :

L'eau joue un rôle essentiel dans le processus de prise et de durcissement du liant dans le mortier. En réagissant chimiquement avec le liant, elle initie la formation d'une matrice solide qui lie les agrégats ensemble. Cependant, la quantité d'eau ajoutée a un impact significatif sur les propriétés du mortier.

D'une part, la quantité d'eau influe sur la maniabilité du mortier, c'est-à-dire sa facilité à être travaillé et à être étalé. Un mortier trop sec sera difficile à manipuler et à appliquer, tandis qu'un mortier trop humide risque de s'affaisser et de perdre sa forme, ce qui peut compromettre la qualité de la construction.

D'autre part, un excès d'eau peut également nuire aux performances du mortier. Une surabondance d'eau dilue la concentration de liant dans le mélange, affaiblissant ainsi sa résistance finale. De plus, un mortier excessivement humide peut présenter une plus grande susceptibilité à la fissuration et à la dégradation, ce qui réduit sa durabilité à long terme.

Par conséquent, il est crucial de trouver un équilibre approprié entre la maniabilité et la performance lors du dosage de l'eau dans le mortier. Cela implique de doser avec précision la quantité d'eau pour obtenir un mortier suffisamment maniable pour le travail, tout en évitant un excès qui compromettrait sa résistance et sa durabilité. Des techniques de mélange appropriées et une attention particulière à la consistance du mortier pendant le processus de fabrication peuvent aider à atteindre cet équilibre.

### 1.2.3 Rôle et domaines d'utilisation de mortier :

Le mortier joue un rôle crucial dans la construction en servant de liaison entre les différents éléments structurels tels que les briques, les pierres ou les blocs. Sa composition et ses propriétés variées lui permettent d'accomplir plusieurs fonctions essentielles dans les projets de construction.

Tout d'abord, le mortier est utilisé pour assembler les éléments de maçonnerie. En appliquant une couche de mortier entre chaque unité, que ce soit des briques, des pierres ou des blocs, il crée une liaison solide qui stabilise la structure et résiste aux charges. Cette fonction est essentielle pour garantir la stabilité et la durabilité des murs, des piliers et d'autres éléments de construction.

En outre, le mortier est également utilisé comme matériau de remplissage et de nivellement. Dans certaines applications, il est utilisé pour remplir les cavités entre les blocs ou les briques, assurant ainsi une surface lisse et uniforme. De plus, il peut être utilisé pour niveler les surfaces avant l'installation de revêtements de sol ou de carreaux.

Un autre rôle important du mortier est de fournir une protection contre les éléments extérieurs. En scellant les joints entre les matériaux de construction, il empêche l'infiltration d'eau, d'air ou de contaminants, ce qui contribue à prévenir les dommages causés par l'humidité, le gel et d'autres conditions environnementales défavorables. Cette fonction est particulièrement importante dans les régions sujettes aux intempéries ou aux changements climatiques.

En outre, le mortier peut être utilisé pour renforcer les structures existantes ou pour effectuer des réparations. En appliquant un mortier approprié sur les zones endommagées ou affaiblies, il est possible de restaurer l'intégrité structurelle et d'assurer la sécurité à long terme des bâtiments et des infrastructures.

La composition du mortier peut varier en fonction des exigences spécifiques de chaque projet. Les mortiers à base de ciment sont largement utilisés en raison de leur résistance élevée et de

## Chapitre 1 : Les Cendres dans le Mortier

leur durabilité. Cependant, d'autres types de mortier, tels que ceux à base de chaux ou de terre, peuvent également être utilisés en fonction des besoins spécifiques de chaque application.

### 1.2.4 Classification des mortiers []

Les mortiers peuvent être classés selon plusieurs critères, notamment leur composition, leur résistance, leur application et leur temps de prise. Voici une classification courante des mortiers :

#### **Classification selon la composition :**

Mortiers à base de ciment : Composés de ciment Portland, de sable et d'eau, ces mortiers offrent une résistance élevée et sont largement utilisés dans la construction.

Mortiers à base de chaux : Composés de chaux hydraulique ou aérienne, de sable et d'eau, ces mortiers sont appréciés pour leur flexibilité et leur capacité à respirer.

Mortiers à base de terre : Fabriqués à partir de terre crue ou de terre stabilisée, ces mortiers sont utilisés dans la construction écologique et durable.

#### **Classification selon la résistance :**

Mortiers de faible résistance : Utilisés pour des applications non structurelles telles que le jointoiement de briques ou de blocs légers.

Mortiers de résistance moyenne : Utilisés pour des applications semi-structurelles telles que le montage de briques et de blocs dans des murs porteurs.

Mortiers de haute résistance : Utilisés pour des applications structurelles nécessitant une résistance élevée comme les fondations ou les murs de soutènement.

#### **Classification selon l'application :**

Mortiers de maçonnerie : utilisés pour l'assemblage de briques, de blocs ou de pierres dans la construction de murs et d'ouvrages maçonnés.

Mortiers de ragréage : utilisés pour niveler et lisser les surfaces avant l'installation de revêtements de sol ou de carreaux.

Mortiers de réparation : utilisés pour réparer les fissures, les creux et les dégradations dans les structures existantes.

#### **Classification selon le temps de prise :**

Mortiers à prise rapide : Durcissent rapidement et sont utilisés pour les réparations urgentes ou les travaux nécessitant un séchage rapide.

Mortiers à prise normale : Ont un temps de prise standard et sont utilisés dans la plupart des applications de construction.

Mortiers à prise retardée : Offrent un temps de travail prolongé et sont utilisés lorsque des délais plus longs sont nécessaires pour l'installation.

Cette classification permet de mieux comprendre les différentes caractéristiques et utilisations des mortiers, aidant ainsi à sélectionner le type approprié en fonction des besoins spécifiques de chaque projet de construction.

### 1.2.5. Classement des mortiers en fonction des adjuvants utilisés:[2]

Les mortiers, composants essentiels de nombreux projets de construction, peuvent être catégorisés en plusieurs classes en fonction des adjuvants utilisés pour modifier leurs caractéristiques. Chaque classe joue un rôle spécifique dans l'amélioration des performances et de la durabilité des mortiers, bétons et coulis.

#### **Classe 1 : Modification des caractéristiques à l'état Frais**

Les adjuvants de Classe 1 sont conçus pour influencer les propriétés des mortiers, bétons et coulis lorsqu'ils sont à l'état frais. Ces adjuvants peuvent modifier la plasticité, la viscosité et la maniabilité du matériau, facilitant ainsi sa mise en œuvre et son application sur le chantier. Ils permettent également d'optimiser la cohésion et l'homogénéité de la mixture.

#### **Classe 2 : Modification pendant la prise et le durcissement**

Les adjuvants de Classe 2 interviennent pendant la phase de prise et de durcissement des mortiers, bétons et coulis. Leur action vise à contrôler le temps de prise, la vitesse de durcissement et la résistance finale du matériau. Ces adjuvants sont essentiels pour garantir un durcissement uniforme et optimal, tout en permettant d'adapter le temps de travail en fonction des conditions de chantier.

#### **Classe 3 : Modification de la Teneur en air ou en autres Gaz**

Les adjuvants de Classe 3 sont destinés à ajuster la teneur en air ou en autres gaz dans les mortiers, bétons et coulis. Ils sont utilisés pour contrôler la porosité du matériau, améliorant ainsi sa résistance au gel-dégel et sa durabilité dans des environnements agressifs. Ces adjuvants sont particulièrement importants dans les régions sujettes aux variations climatiques extrêmes.

#### **Classe 4 : Modification de la Résistance**

Les adjuvants de Classe 4 sont spécifiquement formulés pour améliorer la résistance des mortiers, bétons et coulis. Leur action renforce la structure du matériau, augmentant sa résistance à la compression, à la traction et à la flexion. Ces adjuvants sont largement utilisés dans la construction d'ouvrages soumis à des charges importantes, tels que les ponts, les routes et les bâtiments de grande hauteur.

#### **Classe 5 : Amélioration de la Durabilité**

Les adjuvants de Classe 5 sont conçus pour améliorer la durabilité des mortiers, bétons et coulis, en augmentant leur résistance à l'abrasion, à la corrosion et aux agents chimiques agressifs. Leur action protège le matériau contre les dommages causés par l'exposition prolongée à des conditions environnementales défavorables, prolongeant ainsi sa durée de vie utile.

#### **Classe 6 : Propriétés Spéciales**

La Classe 6 regroupe les adjuvants destinés à modifier des propriétés spéciales des mortiers, bétons et coulis. Ces adjuvants peuvent être utilisés pour conférer des caractéristiques particulières au matériau, telles que la conductivité thermique, l'imperméabilité ou la

## Chapitre 1 : Les Cendres dans le Mortier

résistance au feu. Leur utilisation permet de répondre à des exigences techniques et esthétiques spécifiques dans des applications spécialisées.

### 1.2.6. Préparation des mortiers :

#### 1.2.6.1. Dosage de mortiers.

Le tableau suivant présente les quantités nécessaires pour un mélange de mortier.

Matériau	Quantité nécessaire
Ciment	054 g
Sable	1350 g
Eau	346.5 ml

Tableau 1.1 dosage des mortiers

Préparer du mortier en incorporant de la cendre de coques de noix est un processus détaillé qui nécessite une attention particulière à chaque étape. Dans cet exposé, nous explorerons en profondeur les différentes étapes de ce processus, en mettant en évidence les considérations importantes à prendre en compte pour obtenir un mortier de haute qualité.

### Préparation de la Cendre de Coques de Noix

La première étape consiste à préparer la cendre de coques de noix. Pour ce faire, on a collecté des coques de noix concassées et on les a brûler pour obtenir une cendre. Cette cendre a été ensuite broyée pour obtenir une texture fine et homogène, prête à être incorporée dans le mortier.

### Mélange des Ingrédients

Avec les proportions déterminées en main, commencez par mélanger le ciment et le sable dans gamate. Une fois que le mélange de ciment et de sable est uniforme, commencez à ajouter progressivement la cendre de coques de noix. Ajoutez ensuite l'eau et commencez à mélanger jusqu'à obtenir une consistance homogène. Il est important de mélanger soigneusement pour assurer une distribution uniforme des matériaux.

### 1.2.7. Les principales caractéristiques du mortier :

Le mortier est un matériau de construction essentiel, utilisé pour assembler des éléments tels que des briques, des parpaings, des pierres et des carreaux. Il est composé d'un liant hydraulique (ciment, chaux ou plâtre), de sable, d'eau et d'éventuels adjuvants. Les caractéristiques du mortier dépendent de sa composition et de son mode de fabrication.

#### 1.2.7.1 Résistance à la compression :

## Chapitre 1 : Les Cendres dans le Mortier

C'est la capacité du mortier à résister à des forces qui tendent à l'écraser. La résistance à la compression est exprimée en méga pascals (MPa). [3]

### 1.2.7.2 Résistance à la flexion :

C'est la capacité du mortier à résister à des forces qui tendent à le courber. La résistance à la flexion est exprimée en méga newtons par mètre carré (MN/m<sup>2</sup>).

[3]

### 1.2.7.3 Adhérence :

C'est la capacité du mortier à adhérer aux éléments qu'il assemble. L'adhérence est exprimée en méga pascals (MPa)

[4]

### 1.2.7.4 Ouvrabilité :

C'est la facilité avec laquelle le mortier peut être mis en œuvre.

L'ouvrabilité est influencée par la quantité d'eau, la granulométrie du sable et la présence d'adjuvants.

### 1.2.7.5 Durcissement :

C'est le processus par lequel le mortier passe d'un état plastique à un état solide. Le durcissement est influencé par la composition du mortier, la température et l'humidité ambiante.

### 1.2.7.6 Porosité :

C'est la proportion de vides dans le mortier. La porosité du mortier influence sa perméabilité à l'eau et à l'air.

### 1.2.7.7 Densité :

C'est la masse du mortier par unité de volume. La densité du mortier est exprimée en kilogrammes par mètre cube (kg/m<sup>3</sup>).

**1.2.7.8 Conductivité thermique :** C'est la capacité du mortier à conduire la chaleur. La conductivité thermique du mortier est exprimée en watts par mètre par kelvin (W/m. K).

En plus de ces caractéristiques principales, le mortier peut également présenter d'autres caractéristiques, telles que :

**1.2.7.9 Résistance à l'eau :** C'est la capacité du mortier à résister à l' pénétration de l'eau.

**1.2.7.10 Résistance au gel :** C'est la capacité du mortier à résister aux cycles de gel et dégel.

**1.2.7.11 Résistance aux produits chimiques :** C'est la capacité du mortier à résister à l'attaque des produits chimiques. [5]

## 1.3 Historique sur l'utilisation de cendres dans le mortier : [6]

L'utilisation des cendres dans le mortier remonte à l'Antiquité. Les premières traces remontent aux civilisations grecques et romaines, qui employaient des cendres volcaniques, appelées pouzzolanes, pour améliorer les propriétés de leurs mortiers. Les pouzzolanes réagissent

## Chapitre 1 : Les Cendres dans le Mortier

chimiquement avec la chaux pour former des composés hydrauliques, ce qui confère au mortier une résistance accrue et une meilleure durabilité.

Les Romains, pionniers de l'utilisation des cendres dans le mortier :

Les Romains étaient des maîtres de l'art de la construction et ont perfectionné l'utilisation des cendres volcaniques dans leurs mortiers. Ils ont notamment utilisé la pouzzolane de Santorin, une île grecque volcanique, pour construire des structures emblématiques telles que le Colisée et le Panthéon. Ces monuments, encore debout aujourd'hui après des siècles, témoignent de l'efficacité des mortiers romains à base de cendres.

### 1.3.1. Le Moyen Âge et la redécouverte des cendres :

Après la chute de l'Empire romain, l'utilisation des cendres dans le mortier a connu un déclin. Il a fallu attendre le Moyen Âge pour que cette pratique ne soit redécouverte. Les bâtisseurs médiévaux ont recommencé à utiliser des pouzzolanes locales, souvent issues de fours à chaux ou de volcans éteints.[7]

### 1.3.2. L'ère industrielle et l'essor des cendres volantes :

La révolution industrielle a marqué un tournant dans l'utilisation des cendres dans le mortier. L'essor des centrales à charbon a produit de grandes quantités de cendres volantes, un sous-produit de la combustion du charbon. Ces cendres volantes se sont avérées être un excellent substitut aux pouzzolanes naturelles, et leur utilisation s'est rapidement répandue dans l'industrie de la construction.

Aujourd'hui, les cendres sont toujours utilisées dans le mortier :

De nos jours, les cendres volantes sont l'un des additifs les plus courants dans le mortier. Elles permettent de réduire la quantité de ciment nécessaire, ce qui a un impact positif sur l'environnement en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. De plus, les cendres volantes améliorent la maniabilité du mortier et sa résistance à la sulfatation. [8]

### 1.3.3 Avantages de l'utilisation des cendres dans le mortier :

#### Réduction de la quantité de ciment :

Les cendres volantes peuvent remplacer jusqu'à 30% du ciment dans le mortier, ce qui permet de réduire la consommation de cette ressource naturelle et de diminuer les émissions de CO<sub>2</sub> liées à sa production.

Amélioration de la maniabilité : Les cendres volantes rendent le mortier plus plastique et plus facile à travailler, ce qui améliore le confort des ouvriers et la qualité de la finition.

Augmentation de la résistance à la sulfatation : Les cendres volantes protègent le mortier de l'attaque des sulfates, présents dans l'eau et les sols, ce qui est particulièrement important dans les zones côtières et les zones où les sols sont pollués.

Meilleure durabilité : Les mortiers à base de cendres volantes ont une meilleure résistance à l'usure, au gel-dégel et aux cycles humides-secs, ce qui prolonge leur durée de vie. [8]

# Chapitre 2

### Chapitre 2 : Étude des propriétés des matériaux

#### 2.1. Introduction :

Dans Ce chapitre, nous exposons les matériaux utilisés, comprenant la description des dunes de sable et des cendres de coquilles de noix, ainsi que les tests de caractérisation, incluant densité, finesse, volume apparent et analyse chimique, pour une compréhension approfondie de leurs propriétés physiques et chimiques.

#### 2.2 Étude des propriétés des matériaux :

##### 2.2.1. Sable de dune :

Le sable utilisé provient de l'OUED Z' HOUR de Skikda. Il est classé en classe granulaire 0/1, représentant un sable roulé utilisé dans la recherche actuelle pour diverses analyses et tests de caractérisation.

##### 2.2.1.a Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est une procédure qui permet de déterminer la répartition des grains de sable en fonction de leurs tailles. Dans le cas du sable de dune, cette analyse est particulièrement importante car elle permet de caractériser ses propriétés physiques et mécaniques [9]

Ouverture des tamis mm	Rufus g	Refus cumulé %	Tamisât cumulé %
1	0	0	100
0.5	14.8	4.93	95
0.25	140.9	46.96	53
0.125	295	98.33	2
0.063	297.4	99.13	1
MF		1,5	

Tableau 2.1 Analyse granulométrique

Selon la norme européenne (EN12620) le module de finesse est égal à 1/100 de la somme des refus cumulés en pourcentages des tamis (0,125- 0,25- 0,5- 1 -2-4) soit  $Mf = 98,33 + 46,96 + 4,93 / 100 = 1,5$  → notre sable est à majorité de grains fins

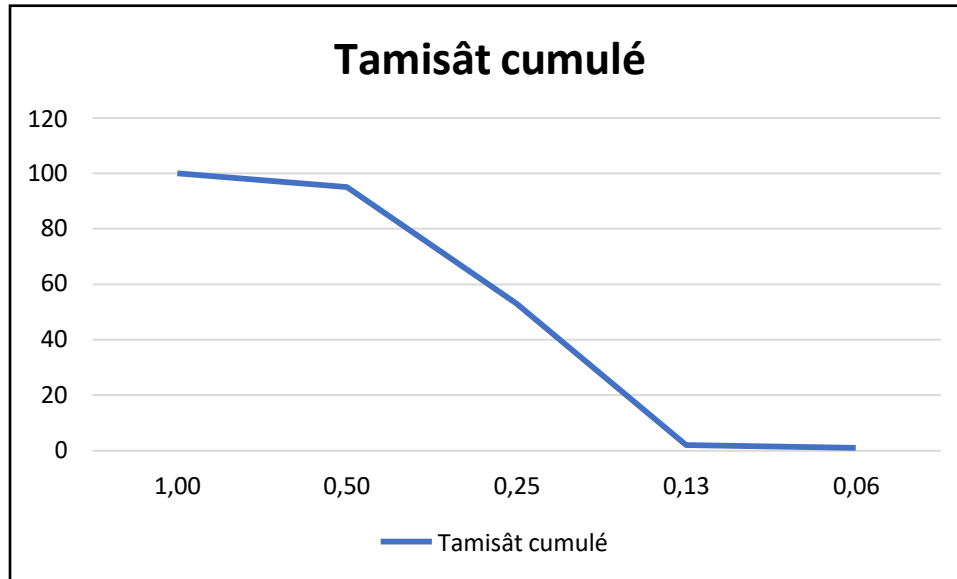


Figure 2.1 Courbe granulométrique

### 2.2.1.b L'équivalent de sable :

L'équivalent de sable est une mesure qui permet de quantifier la propreté d'un matériau granulaire en termes de fines. Un équivalent de sable élevé indique un matériau plus propre avec moins de fines, ce qui peut être souhaitable dans de nombreuses applications de construction

### 2.2.1.c La masse volumique :

La masse volumique absolue et la masse volumique apparente sont deux concepts importants en physique et en géologie pour caractériser la densité des matériaux comme le sable de dune.

#### 1. Masse volumique absolue :

La masse volumique absolue d'un matériau, souvent notée  $\rho$  (rho), représente la masse par unité de volume réel du matériau, c'est-à-dire la masse de l'ensemble des particules qui composent le matériau sans tenir compte des vides entre les particules. Pour déterminer la masse volumique absolue du sable de dune, vous devrez mesurer la masse du sable puis diviser cette masse par le volume réel qu'il occupe.

Formule : Masse volumique absolue ( $\rho$ ) = Masse / Volume réel

Pour mesurer la masse volumique absolue du sable de dune, vous pouvez utiliser une méthode de laboratoire qui implique généralement la pesée précise du sable et la mesure précise du volume réel qu'il occupe, par exemple en utilisant un cylindre gradué et en remplissant le sable jusqu'au volume voulu.

#### 2. Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente d'un matériau, également notée  $\rho$  (rho), prend en compte à la fois la masse du matériau et les vides entre ses particules. C'est une mesure de la densité apparente du

## Chapitre 2 : Étude des propriétés des matériaux

matériau lorsque celui-ci est dans un état compacté ou non. Pour le sable de dune, cela inclut les vides entre les grains de sable.

Formule : Masse volumique apparente ( $\rho$ ) = Masse / Volume total

Le volume total comprend à la fois le volume des grains de sable et les espaces vides entre ces grains.

Pour mesurer la masse volumique apparente du sable de dune, vous pouvez effectuer un essai de densité en utilisant une méthode de laboratoire qui implique de mesurer la masse du sable puis de diviser cette masse par le volume total qu'il occupe, y compris les vides entre les grains.



Figure 2.3 Masse volumique apparente du sable

Masse volumique apparente

$$\rho = 1255,7 / 966 = 1,299 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho = 1,299 \text{ g/cm}^3$$

La masse volumique apparente du sable est donc 1,299 g/cm<sup>3</sup>.

### 2.2.2. Cendres de coquilles de noix :

Les coquilles de noix, sont collectées, brûlées jusqu'à obtenir des cendres, puis moulues pour avoir une texture plus au moins homogène.

### 2.2.2. Masse volumique :

#### A. La masse volumique apparent :

La Masse volumique apparent du cendre =  $0,39 \text{ G/cm}^3$

#### B. La masse volumique absolue :

La mesure de la masse volumique absolue des cendres de coquilles de noix, a été faite selon ces étapes :

1. Préparez un échantillon représentatif de cendres.
2. Mesurez la masse de l'échantillon avec une balance précise.
3. Utilisez un pycnomètre pour mesurer le volume réel des cendres. Remplissez le pycnomètre d'eau, ajoutez les cendres et mesurez le volume total.



Figure 1.3 La mesure de la masse des cendres



Figure 2.4 La mesure de la masse volumique absolue

La masse volumique absolue des cendres de coquilles de noix mesurée est égale à **0.639 g/cm<sup>3</sup>**, indiquant la densité réelle du matériau après les essais de laboratoire. On constate que les cendres de coquilles de noix sont très légères par rapport au ciment.

### 2.2.3. Ciment :

Le ciment CEM II est un ciment Portland composé, ce qui signifie qu'il contient principalement du clinker (au moins 65%) mais également d'autres constituants (jusqu'à 35%) tels que :

- Laitier de haut fourneau
- Fumée de silice (limitée à 10%)
- Pouzzolane naturelle
- Cendres volantes
- Calcaires

Ces ajouts permettent d'obtenir des propriétés spécifiques au ciment CEM II comparé au ciment Portland classique (CEM I) :

- Amélioration de la résistance aux sulfates et aux attaques chimiques.
- Réduction de la chaleur d'hydratation, utile pour les structures massives.
- Amélioration de la durabilité. [10]



Figure 2.6 Sac de Ciment GICA

### 2.2.3.a Masse volumique apparente du ciment :

Pour déterminer la masse volumique apparente du ciment, procédez comme suit :

**Préparer l'équipement** : balance précise, cylindre gradué, entonnoir.

**Échantillon** : homogénéiser le ciment.

**Remplir le cylindre** : verser doucement le ciment sans tasser.



Figure 2.7 Remplissage du cylindre

**Nivellement** : enlever l'excès avec une règle.



Figure 2.8 Nivellement

**Pesée :** peser le cylindre vide, puis rempli.



Figure 2.9 peser le cylindre rempli

**Calcul :** soustraire la masse du cylindre vide de la masse totale, puis diviser par le volume du cylindre.

Masse du cylindre vide ( $m_{\text{vide}}$ ) = 1371 g

Masse du cylindre rempli ( $m_{\text{rempli}}$ ) = 2590,24 g

Volume du cylindre ( $V$ ) = 966 cm<sup>3</sup>

On a Suivez ces étapes :

Calculer la masse du ciment :

Masse du ciment = Masse du cylindre rempli - Masse du cylindre vide

Masse du ciment = 2590,24 g - 1371 g = 1219,24 g

## Chapitre 2 : Étude des propriétés des matériaux

Calculer la masse volumique apparente :

Masse volumique apparente

$$\rho = 1219,24 \text{ g} / 966 \text{ cm}^3 = 1,262 \text{ g/cm}^3$$

La masse volumique apparente du ciment est donc  $1,262 \text{ g/cm}^3$ .

# **Chapitre 3**

## Chapitre 3 : Le programme expérimental et méthodologie d'essais

### Chapitre 3 : Le programme d'essai et la méthodologie de test

#### 3.1 Introduction :

Ce chapitre détaille le programme expérimental avec ses paramètres et essais, ainsi que les formulations, méthodes de fabrication des mélanges et d'essais. Chaque aspect est exposé minutieusement pour offrir une compréhension approfondie des procédures et des méthodologies utilisées dans cette étude.

#### 3.2 Le programme d'essai

##### 3.2.1 Le programme d'essai :

Le but de cette étude est d'analyser les effets de la substitution d'une partie du ciment par des cendres de coquilles de noix, avec des taux de remplacement de 0, 6, 12 et 18 % par rapport aux caractéristiques initiales.

Des taux de remplacement	Type de mortier
0%	Mortier à base de 100 %CEMII.
6%	Mortier à base de 94% CEMII et de 6% de cendres
8%	Mortier à base de 92% CEMII et de 8% de cendres
12%	Mortier à base de 88% CEMII et de 12% de cendres
Paramètres constants	E/C=0.771 Sable de dune
Paramètres variables	Taux de remplacement 0% 6% 8% 12%
Essais effectués	<ul style="list-style-type: none"><li>- Résistance à la traction par flexion</li><li>- Résistance à la compression</li><li>- Absorption d'eau par immersion</li><li>- Absorption d'eau par capillarité</li><li>- Perte en masse due aux attaques chimiques du H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et NaCl</li></ul>
Nombre de mélange	04

Tableau 3.1 Données de l'étude

##### 3.2.2 Le programme d'essais :

###### 3.2.2.1 La résistance en traction par flexion :

## **Chapitre 3 : Le programme expérimental et méthodologie d'essais**

La résistance en traction par flexion du mortier à 2 jours et 7 jours fournit des indications précoces sur sa solidité. À 28 jours, cette résistance pourrait atteindre un niveau significatif, et à 90 jours, une évaluation complète de sa résistance mécanique.

### **3.2.2.2 La résistance en compression :**

La résistance en compression du mortier à 2 jours et 7 jours donne un aperçu précoce de sa solidité. À 28 jours, elle pourrait atteindre un niveau significatif, nécessitant une évaluation complète de son évolution à 90 jours.

### **3.2.2.3 L'absorption d'eau par immersion :**

L'absorption d'eau par immersion mesure la capacité d'un matériau à absorber l'eau lorsqu'il est immergé, évaluant ainsi sa porosité et sa résistance à l'humidité.

### **3.2.2.4 L'absorption d'eau par capillarité :**

L'absorption d'eau par capillarité évalue la capacité d'un matériau à absorber l'eau par ses pores capillaires, fournissant des informations sur sa perméabilité et sa réaction aux conditions d'humidité environnantes dans le sens ascendant.

### **3.2.2.5 Attaques chimiques :**

L'essai d'attaques chimiques évalue la résistance d'un matériau à son exposition à des solutions agressives, telles que l'acide sulfurique  $H_2SO_4$  et les chlorures de sodium  $NaCl$ , à différentes durées (1, 7, 14, 21, 35, 42 et 60 jours), révélant ainsi sa durabilité et sa stabilité.

### **3.2.2.6 Consistance :**

La consistance d'un matériau désigne son état physique, notamment sa fermeté, sa viscosité ou sa malléabilité, évaluée en fonction de sa facilité à être manipulé ou déformé.

### **3.2.2.7 Masse volumique :**

La masse volumique d'un matériau est sa masse par unité de volume, indiquant sa compacité ou sa concentration de matière. Elle est exprimée en unités telles que  $kg/m^3$  ou  $g/cm^3$ .

## Chapitre 3 : Le programme expérimental et méthodologie d'essais

### 3.3 formulations des mélanges :

Mélange	Ciment (g)	La Cendre de Coques de Noix (g)	Sable de dune (g)	Eau (g)
M 0%	450	0	1350	346.5
M 6%	423	27	1350	346.5
M 8%	414	36	1350	346.5
M 12%	396	54	1350	346.5

Tableau 3.2 Formulation des mélanges

### 3.1 Malaxage de mortier :

Les étapes de malaxage du mortier à la main, utilisant une gamatte :

1. **Peser les ingrédients** : peser soigneusement les composants du mortier, y compris le ciment, le sable et l'eau, selon les proportions requises.
2. **Préparation de la gamatte** : Humidifiez légèrement la gamatte pour éviter que le mortier n'y adhère excessivement.
3. **Mélange des ingrédients secs** : Versez le ciment et le sable et la Cendre de coques de noix dans la gamatte et mélangez-les soigneusement à l'aide d'une pelle ou d'une truelle pour assurer une distribution uniforme.
4. **Ajout d'eau** : Créez un puits au centre du mélange sec et ajoutez progressivement de l'eau tout en continuant à mélanger. Assurez-vous de ne pas ajouter trop d'eau d'un coup pour éviter un mortier trop liquide.
5. **Malaxage** : Utilisez une pelle ou une truelle pour mélanger le mortier de manière uniforme jusqu'à ce qu'il atteigne une consistance homogène et lisse, tout en assurant que tous les ingrédients soient bien incorporés.

## Chapitre 3 : Le programme expérimental et méthodologie d'essais



Figure 3.1 malaxage



Figure 3.2 malaxage

### **2.3 Préparation et remplissage des moules:**

Dans cette expérience, nous préparons des moules de type (4×4×16) cm et de type (5×5×5) cm.

Les étapes pour remplir les moules avec du mortier :

### Chapitre 3 : Le programme expérimental et méthodologie d'essais

1. Assurez-vous que les moules sont propres et secs avant de commencer le processus de remplissage.
2. Préparez le mortier selon les instructions du fabricant. Assurez-vous de bien mélanger l'eau et les matériaux pour obtenir un mortier homogène.
3. Remplissez les moules avec le mortier de manière égale et équilibrée, en vous assurant qu'il n'y a pas de bulles d'air.
4. Utilisez un maillet en bois ou en caoutchouc pour compacter le mortier à l'intérieur des moules et lisser la surface.



Figure 3.3 Remplissez les moules

#### **3.3 La conservation des éprouvettes :**

Avant le démoulage, les éprouvettes sont laissées dans un environnement contrôlé pendant 24 heures afin de permettre au matériau de durcir et de prendre sa forme définitive. Cette période de conservation garantit la solidification optimale du matériau, assurant ainsi des résultats précis des tests ultérieurs.

## Chapitre 3 : Le programme expérimental et méthodologie d'essais



Figure 3.4 la conservation des éprouvettes

### 3.4 démoulages des éprouvettes :

Le démoulage est l'étape où les pièces moulées sont retirées des moules après avoir atteint leur solidité appropriée. C'est une phase délicate pour s'assurer que les pièces sont intactes et prêtes pour la prochaine étape du processus.



Figure 3.5 démoulage des éprouvettes

## Chapitre 3 : Le programme expérimental et méthodologie d'essais

### 3.4. Procédures d'essai :

#### 3.4.1 A l'état frais :

##### a. la consistance :

La méthode d'essai choisie sera exécutée en conformité avec la norme NF EN 1015-3 (Figure I 6) afin d'évaluer la consistance. Avant chaque essai, une série d'étapes préparatoires doit être suivie pour garantir l'intégrité des résultats. Tout d'abord, il est impératif de nettoyer méticuleusement le disque utilisé ainsi que la surface intérieure et les bords du moule. Cette étape de nettoyage est effectuée en utilisant un chiffon humide pour éliminer toute particule de saleté ou de résidu qui pourrait compromettre la précision des résultats. Ensuite, il est recommandé de laisser sécher complètement les surfaces nettoyées avant de procéder à l'étape suivante. Une fois que les surfaces ont séché, il est temps de les lubrifier légèrement. Pour cela, une huile minérale non résineuse de très faible viscosité est utilisée. Cette huile est appliquée de manière uniforme sur les surfaces du disque et du moule pour faciliter le processus d'essai et assurer des conditions de friction constantes. L'objectif de cette lubrification est de minimiser toute interférence potentielle entre le matériau testé et les surfaces du moule, ce qui pourrait fausser les résultats de l'essai. En résumé, la préparation méticuleuse des équipements d'essai est essentielle pour garantir la fiabilité et la reproductibilité des résultats. En suivant scrupuleusement les étapes de nettoyage et de lubrification décrites, il est possible d'assurer des conditions optimales pour mener à bien les essais conformément aux normes établies. Cela garantit une évaluation précise de la consistance du matériau testé, fournissant ainsi des données fiables pour les analyses ultérieures.

Placez le moule au centre, compactez-le avec 10 coups, nettoyez, remplissez en deux couches, secouez la table 15 fois à un coup par seconde. Ensuite, retirez le moule. Mesurez l'étalement moyennant deux directions pour des résultats précis.



Figure 3.6 l'étalement

## Chapitre 3 : Le programme expérimental et méthodologie d'essais

### b. la masse volumique :

Pour mesurer la masse volumique réelle du mortier frais, pesez un moule vide avant et après le remplissage avec le mortier. Utilisez une balance de précision de 0,01 g. Ensuite, calculez la masse du mortier en soustrayant la masse du moule vide de la masse du moule rempli. Divisez cette masse par le volume du moule pour obtenir la masse volumique. L'équation pour calculer la masse volumique ( $\rho$ ) est :

$$\rho = m/v$$

**M** est la masse du mortier

**V** est le volume du moule.

$M =$  La masse de moule rempli – la masse de moule vide



Figure 3.6 moule vide



Figure 3.7 moule rempli

### 3.4.2 A l'état durci :

#### a. Résistance à la compression :

L'essai de résistance à la compression sur demi-épreuves de mortier évalue sa force. Une charge est appliquée à l'éprouvette jusqu'à la rupture. La résistance est calculée en divisant la charge maximale par la section transversale de l'éprouvette. Cet essai est crucial pour évaluer la qualité du mortier et sa capacité à résister aux forces compressives. Les résultats, généralement exprimés en méga pascals (MPa),

L'équation principale utilisée est pour calculer la résistance à la compression  $f_c$ . Elle se fait en divisant la charge maximale supportée par l'éprouvette ( $F_{max}$ ) par sa section transversale  $A$ . L'équation est ainsi :

$$f_c = F_{max} / A$$

### Chapitre 3 : Le programme expérimental et méthodologie d'essais

$F_{max}$  : la charge en N

$A$  : la section en  $\text{mm}^2$



Figure 3.9 essai de compression

#### b. Résistance en traction par flexion :

Le dispositif de flexion est conçu pour tester la résistance d'échantillons de mortier à la flexion. Il comporte trois appuis, dont deux sont semi-cylindriques et le troisième est équidistant des deux premiers. Cette configuration assure une répartition uniforme des charges sur les échantillons. Pour garantir des résultats précis, l'essai est effectué dans une enceinte spéciale qui minimise les échos sonores. Cela permet d'éliminer les interférences potentielles causées par les ondes sonores réfléchies, assurant ainsi des conditions stables et fiables pour l'essai

$$R_c = \frac{3PL}{2bh^2}$$

$R_c$  : la résistance en flexion en  $\text{kgf/cm}^2$ ,

$P$  : la charge appliquée en Newton (kgf),

$L$  : la portée de l'éprouvette entre les appuis en cm,

$b$  : la largeur de l'éprouvette en cm,

$h$  : la hauteur de l'éprouvette en cm

### Chapitre 3 : Le programme expérimental et méthodologie d'essais



Figure 3.9 essai de traction par flexion

#### c. Absorption par immersion :

Le coefficient d'absorption d'un matériau, mesuré selon la norme NF P 18-555, reflète sa capacité à absorber des liquides, comme l'eau. On sèche d'abord un échantillon à l'étuve à 105°C jusqu'à 24h pour obtenir son poids initial. Ensuite, on l'immerge pendant 24 heures, l'essuie superficiellement, et le pèse à nouveau. Le rapport entre la prise de poids et le poids sec initial donne le coefficient d'absorption. Une valeur élevée indique une forte porosité et donc une capacité d'absorption importante.

$$Ab = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100$$

Ms : masse sèche

Mh : masse humide



Figure 3.10 étuve

### Chapitre 3 : Le programme expérimental et méthodologie d'essais

#### d. Absorption d'eau par capillarité :

Cette caractéristique évalue l'absorption d'eau par la pierre, après avoir séché les éprouvettes à 70°C. Exposées à 3 mm d'eau, leur capacité d'absorption est exprimée par le coefficient de capillarité C.

L'équation de calcul est

$$C = (M_h - M_s) / A\sqrt{T}.$$



Figure 3.11 absorption d'eau par capillarité

#### e. Essais de perte en masse due aux attaques chimiques :

Les échantillons de test, initialement pesés, sont immergés dans des solutions de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à 5% et de NaCl à une température de 20°C. Ensuite, leurs masses sont déterminées pour évaluer l'ampleur de l'attaque chimique. Nous effectuons ces tests après 28 jours de décoffrage des éprouvettes.

Les tubes à essai seront pesés après nettoyage à l'eau, puis séchés. Pesées aux jours 1, 7, 14, 28, 42, 60. Solution renouvelée chaque 07 jours.

$$V_m = [(M_s - M_i) / M_s] * 100$$

M<sub>s</sub> : masse avant immersion

M<sub>i</sub> : masse après immersion

V<sub>m</sub> : variation de la masse

### Chapitre 3 : Le programme expérimental et méthodologie d'essais



Figure 3.12 les attaques chimiques

#### 3.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé en détail le programme d'essai et la méthodologie utilisée dans notre étude. Le programme d'essai comprend l'analyse des effets de la substitution partielle du ciment par des cendres de coques de noix à différents taux de remplacement. Les expérimentations comprennent des tests de résistance en traction par flexion, en compression, d'absorption d'eau par immersion et par capillarité, ainsi que des essais de résistance chimique. Les mélanges ont été formulés selon des proportions spécifiques, suivies de procédures précises de malaxage, de remplissage des moules, de conservation des éprouvettes et de démoulage. Les essais ont été réalisés à différents stades, à l'état frais et durci, en suivant des normes spécifiques pour garantir des résultats précis et fiables. La variation de masse des échantillons soumis à l'attaque chimique a également été évaluée. En conclusion, ce chapitre offre une compréhension approfondie du processus expérimental et des méthodes utilisées, jetant ainsi les bases solides pour l'analyse des résultats et les conclusions ultérieures.

# Chapitre 4

### Chapitre 4 : Résultats et discussions

#### 4.1 Introduction :

Dans ce chapitre, les résultats des essais sur l'état frais des mortiers, notamment la consistance, la densité, ainsi que les résultats sur l'état durci, comme la résistance à la compression et à la traction par flexion à des âges de 2, 7, 28 et 90 jours, sont présentés. De plus, les résultats des essais de durabilité sont également inclus.

#### 4.2 A l'état frais :

##### 4.2.1 La masse volumique :

Le tableau ci-dessous représente les résultats des mesures de la masse volumique des différents mélanges à l'état frais.

Échantillon	masse du moule (g)	masse du moule + Mortier (g)	volume du moule cm <sup>3</sup>	masse volumique(g/cm <sup>3</sup> )
M0%	1981	3090	500	2,218
M6%	1995	3168.2	500	2,346
M8%	1974	3160	500	2,372
M12%	1980	3107	500	2,254

Tableau 4.1 résultats de la masse volumique

En analysant ces données, nous observons comment la proportion des cendres dans le mélange affecte la masse volumique du mortier résultant. Par exemple, nous pourrions remarquer que la masse volumique semble augmenter à mesure que la proportion de mortier dans le mélange augmente jusqu'à 8%, après quoi elle diminue ou reste relativement constante.

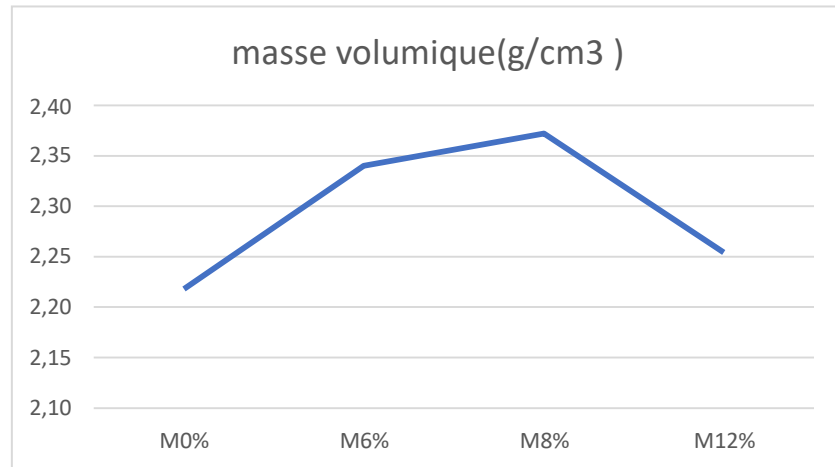


Figure 4.1 résultats de la masse volumique

### 4.2.2 La Consistance :

Ce tableau présente des données sur l'étalement du mortier en fonction des différentes proportions de mortier dans le mélange.

échantillon	Étalement en cm
0%M	21.25
6%M	22.75
8%M	20
12%M	15.5

Tableau 4.2 Résultats de l'étalement du mortier en fonction du taux de substitution

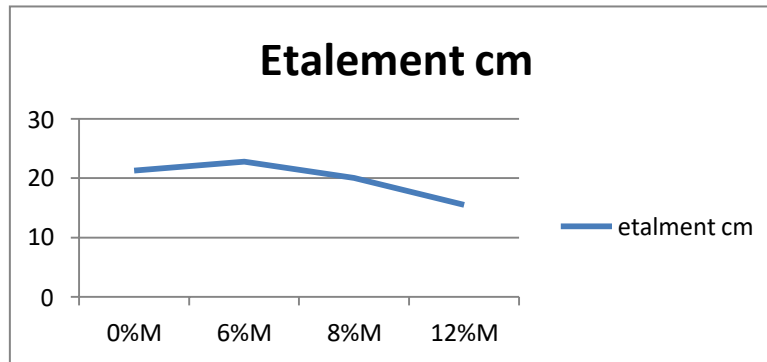


Figure 4.2 présente des données sur l'étalement du mortier en fonction du taux de substitution

- Une légère augmentation de cendres (jusqu'à 6%) semble améliorer la fluidité du mortier, comme le montre l'augmentation de l'étalement.
- Au-delà de cette proportion, l'ajout supplémentaire de cendres réduit la fluidité, comme le montrent les étalements de 20 cm à 8% de cendres et de 15.5 cm à 12% de cendres.

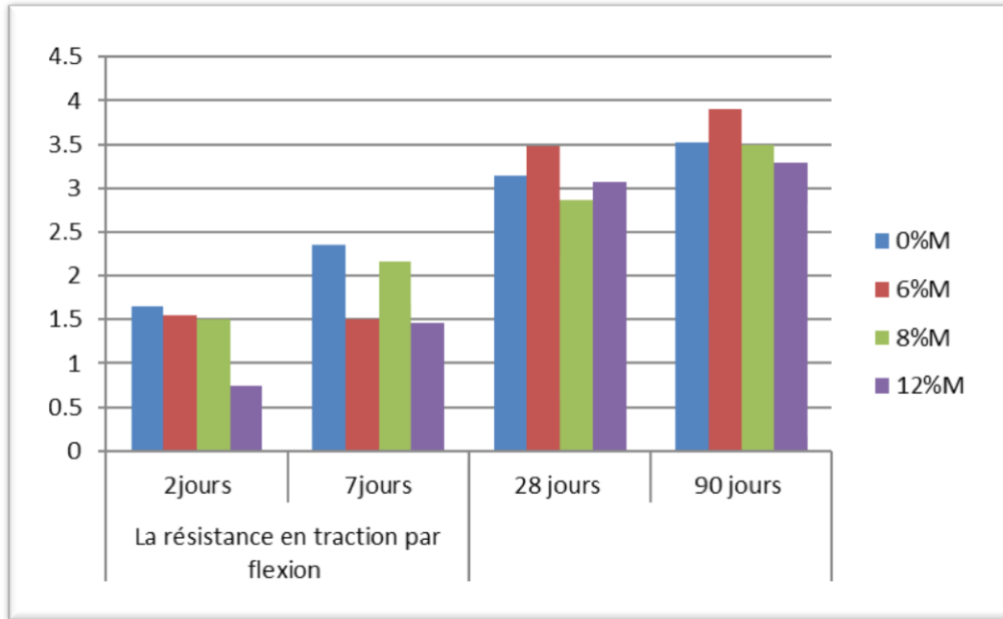
#### 4.3 A l'état durci :

##### 4.3.1 La résistance en traction par flexion :

Ce tableau présente des données sur la résistance en traction par flexion du mortier à différents âges, en fonction de différentes proportions de cendres dans le mélange.

échantillon	2jours	7jours	28 jours	90 jours
0%M	1.65	2.35	3.15	3.52
6%M	1.55	1.50	3.48	3.9
8%M	1.50	2.16	2.87	3.5
12%M	0.75	1.46	3.07	3.29

Tableau 4.3 La résistance en traction par flexion en fonction de l'âge et du taux de substitution



**Figure 4.3** La résistance en traction par flexion en fonction de l'âge et du taux de substitution

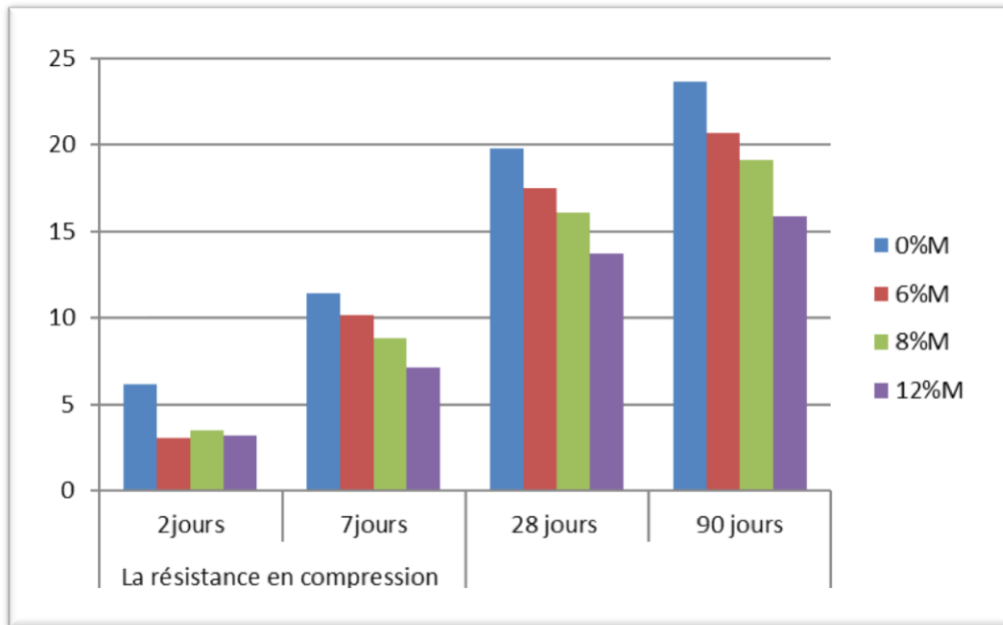
La proportion de cendres semble avoir un impact significatif sur la résistance en traction par flexion. Par exemple, à 28 jours, l'échantillon avec 6% de cendres affiche la résistance la plus élevée (3.475), tandis que l'échantillon avec 12% de cendres atteint également une résistance élevée (3.07), bien que son départ à 2 jours soit plus bas.

En analysant ces résultats, il est clair que le pourcentage de cendres optimal pour obtenir une résistance maximale en traction par flexion à 90 jours est de 6%.

#### 4.3.2 La résistance en compression :

échantillon	2 jours	7 jours	28 jours	90 jours
0% M	6.18	11.43	19.8	23.62
6% M	3.02	10.17	17.48	20.7
8% M	3.51	8.86	16.11	19.13
12% M	3.18	7.15	13.7	15.85

**Tableau 4.4** La résistance en compression en fonction de l'âge et du taux de substitution



**Figure 4.4** La résistance en compression en fonction de l'âge et du taux de substitution

L'effet de la proportion de cendre semble donc influencer la résistance en compression de manière notable. Cependant, il est également essentiel de noter que la relation entre la proportion de cendre et la résistance en compression n'est pas linéaire. Par exemple, la résistance ne diminue pas de manière uniforme à mesure que la proportion de cendre augmente, et il y a des fluctuations dans les valeurs.

Le mortier sans cendre (témoin, 0% de cendre) montre la meilleure résistance à la compression à long terme, avec 23.62 Mpa à 90 jours, dépassant les performances des mélanges contenant des pourcentages de cendre plus élevés

#### 4.3.3 L'absorption d'eau par immersion :

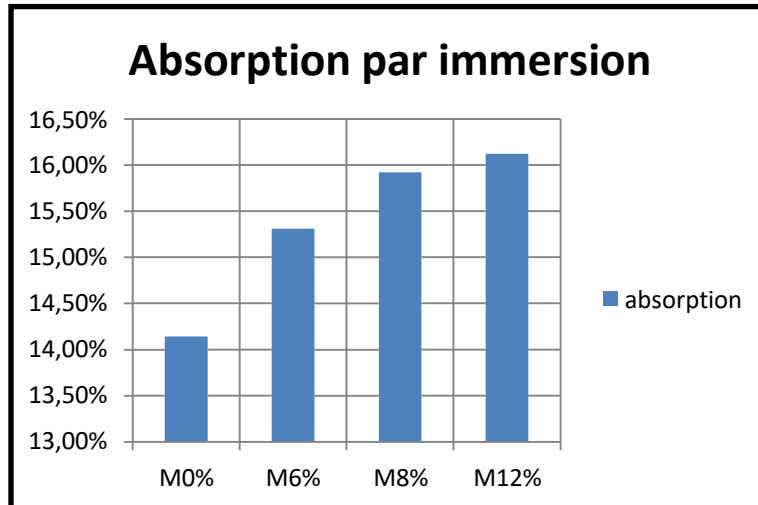
Pour analyser la relation entre la proportion de cendre et l'absorption, nous examinons les données fournies :

Échantillons	MH	MS	absorption
0%	540	473.1	14.14%
6%	540	468.3	15.31%
8%	573	494.3	15.92%
12%	507	436.6	16.12%

**Tableau 4.5** L'absorption d'eau par immersion en fonction du taux de substitution

## Chapitre 4 : Résultats et discussions

La relation entre la proportion de cendre et l'absorption semble indiquer une augmentation générale de l'absorption avec une augmentation de la proportion de cendre. Cependant, il est important de noter que cette relation n'est pas nécessairement linéaire, car les valeurs d'absorption ne croissent pas de manière uniforme à mesure que la proportion de cendre augmente.



**Figure 4.5** L'absorption d'eau par immersion en fonction du taux de substitution

### 4.3.4 absorptions d'eau par capillarité :

	0 min	2 min	7 min	17 min	37 min	77 min	137 min	197 min	257 min
0%	476.6	478.50	479.4	480.5	282.2	483.9	485.8	487.4	488.3
6%	472.6	476.40	477.3	479	482.1	484.9	487.8	490.1	491.5
8%	496.9	499.90	501.2	503	506.1	509.3	511.9	514.2	515.5
12%	441.7	444.90	446.2	448.1	450.8	455.6	458.2	460.7	462.1

**Tableau 4.6** absorption d'eau par capillarité en fonction de l'âge et du taux de substitution

## Chapitre 4 : Résultats et discussions

Age (min)	2.00	7.00	17.00	37.00	77.00	137.00	197.00	257.00
M0%	0.0084	0.0065	0.0059	0.0057	0.0052	0.0048	0.0048	0.0045
M6%	0.016	0.002	0.009	0.0198	0.0087	0.004	0.0077	0.0071
M8%	0.0132	0.0025	0.0093	0.0095	0.0087	0.0079	0.0073	0.0071
M12%	0.014	0.0021	0.0095	0.0098	0.0086	0.0073	0.0076	0.0076

Tableau 4.7 Coefficient de capillarité en fonction de l'âge et du taux de substitution

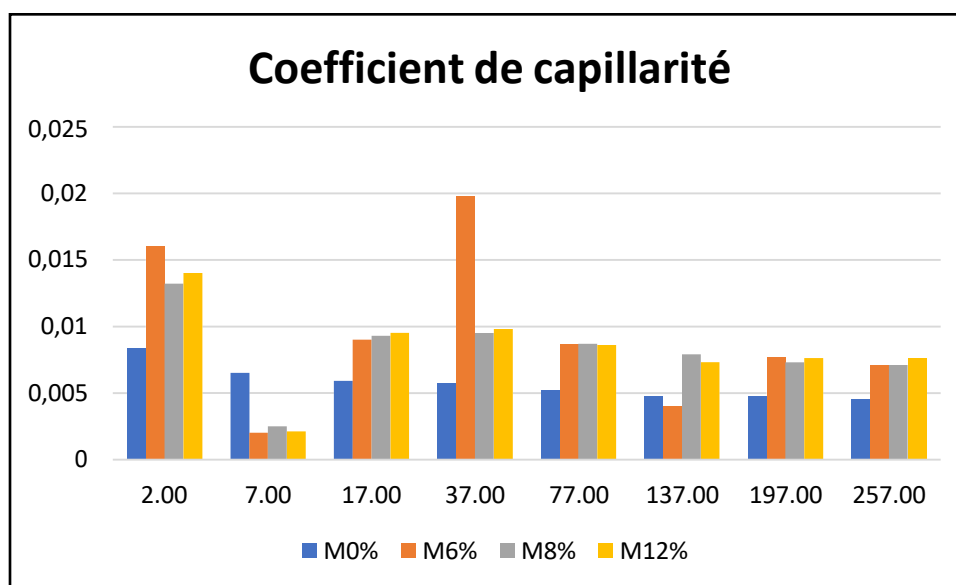


Figure 4.7 Coefficient de capillarite en fonction de l'âge et du taux de substitution

Il semble y avoir des variations significatives du coefficient de capillarité en fonction de l'âge pour chaque niveau de taux de substitution.

Le taux de substitution semble influencer le coefficient de capillarité, bien que la nature exacte de cette relation nécessite une analyse statistique plus approfondie pour être précisément quantifiée

### 4.3.5 Les attaques chimiques :

#### A- conservation dans l'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Les données fournies semblent représenter la perte de masse de différents échantillons exposés à de l'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) pendant différentes périodes de temps.

H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0 jour	1 jour	7 jours	14 jours	28 jours	42 jours	60 jours
M0%	274.95	275.55	276.3	273.2	253.05	211.85	208.15
M6%	273.25	273.6	275.2	274.9	266.3	247.75	257.95
M8%	270	270.6	272.25	272.1	270.95	265.4	269.8
M12%	254.8	255.5	257.05	257.2	254.7	252.2	252.15

## Chapitre 4 : Résultats et discussions

Tableau 4.8 la perte en masse due aux attaques du  $H_2SO_4$  en fonction de l'âge et du taux de substitution

En général, la perte de masse semble diminuer avec le temps pour chaque teneur en cendre. Cela suggère que les échantillons atteignent un état d'équilibre où la perte de masse stabilise ou ralentit. Au fil du temps, on observe généralement une diminution de la perte de masse pour chaque pourcentage de cendre. Cependant, les échantillons à des concentrations de cendre plus élevées semblent avoir une perte de masse initiale plus faible, suivie d'une diminution plus lente par rapport aux échantillons à des concentrations de cendre plus faibles.

À 42 jours, la perte de masse semble être la plus faible pour les échantillons à 12% de cendre, suivis par ceux à 8%, 6%, et enfin 0% de cendre.

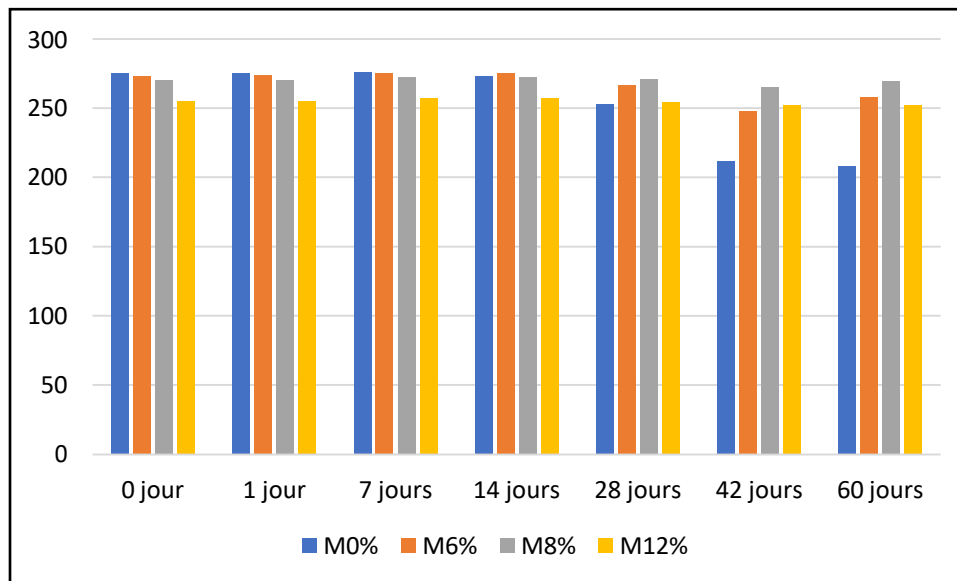


Figure 4.9 la perte en masse due au  $H_2SO_4$  en fonction de l'âge et du taux de substitution

	1 jour	7 jours	14 jours	28 jours	42 jours	60 jours
M0%	-0.22%	-0.49%	0.64%	7.96%	22.95%	1,00%
M6%	-0.13%	-0.71%	-0.60%	2.55%	9.33%	0,95%
M8%	-0.22%	-0.83%	-0.78%	-0.35%	2.46%	0,94%
M12%	-0.27%	-0.88%	-0.94%	0.04%	1.02%	3,29%

Tableau 4.9 pourcentage de la perte de masse en fonction de l'âge et du taux de substitution

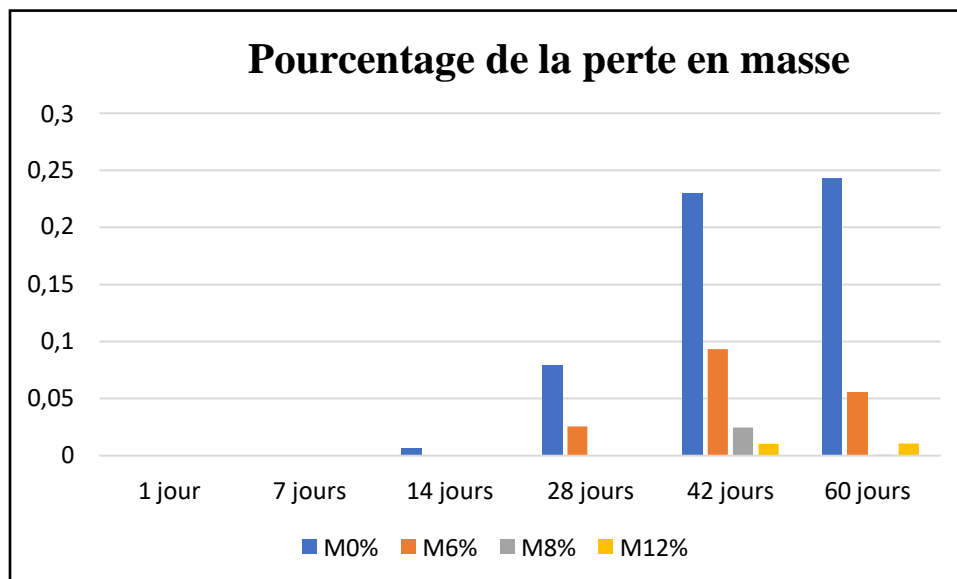


Figure4.10 : pourcentage de perte de masse en fonction de l'âge et du taux de substitution

### B- conservation dans les chlorures de sodium NaCl :

Les données fournies semblent représenter la perte de masse de différents échantillons exposés à du chlorure de sodium (NaCl) pendant différentes périodes de temps

nacl	1 jour	7 jours	14 jours	28 jours	42 jours	60 jours
<b>M0%</b>	0,06%	0,22%	0,42%	0,66%	0,59%	1,00%
<b>M6%</b>	0,02%	0,36%	0,39%	0,49%	0,64%	0,95%
<b>M8%</b>	0,06%	0,33%	0,41%	0,61%	0,63%	0,94%
<b>M12%</b>	0,06%	0,44%	0,52%	0,78%	0,90%	3,29%

Tableau 4.11 : pourcentage de la perte de masse en fonction de l'âge et du taux de substitution

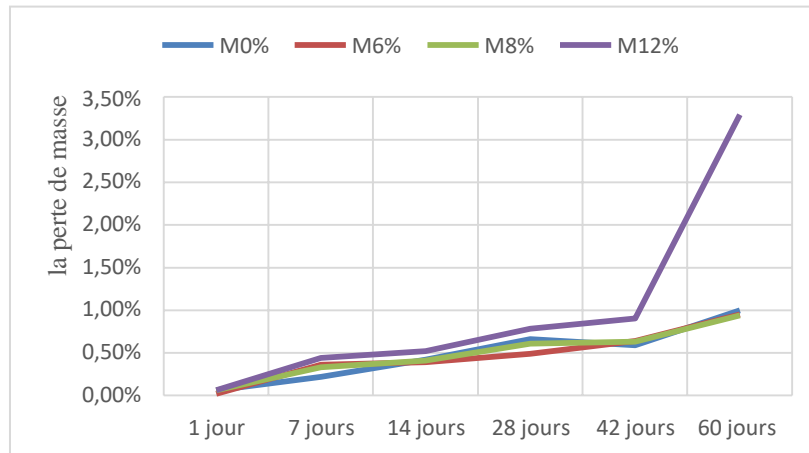


Figure 4.12 : pourcentage de perte de masse en fonction de l'âge et du taux de substitution

Il montre que des concentrations plus élevées initialement entraînent généralement une perte de masse moindre au fil du temps, avec des variations observées entre les périodes et les concentrations.

En examinant les données fournies, il semble que la concentration M6% présente généralement des pourcentages de perte de masse plus bas par rapport aux autres concentrations sur plusieurs périodes. Donc, en se basant uniquement sur ce critère, on pourrait considérer M6% comme la meilleure concentration

### 4.3 Conclusion :

Dans cette étude, une évaluation détaillée des données expérimentales sur les mortiers à différentes concentrations de cendres (0%, 6%, 8%, 12%) a été réalisée. Le chapitre 4 présente les résultats des tests effectués à l'état frais et durci des mortiers, ainsi que leur durabilité.

Dans la section sur l'état frais, les résultats de la masse volumique ont été présentés. Les données indiquent une variation de la densité du mortier en fonction de la concentration de cendres, avec une tendance à augmenter puis à diminuer.

Par exemple, la densité semble augmenter avec la concentration de cendres jusqu'à 8%, puis diminuer à 12%.

Concernant la consistance du mortier, une tendance intéressante a été observée. L'étalement du mortier augmente initialement avec l'ajout de cendres jusqu'à une concentration de 6%, puis diminue à des concentrations plus élevées. Cela suggère une relation complexe entre la proportion de cendres et la consistance du mortier.

Dans la section sur l'état durci, la résistance en traction par flexion et en compression a été évaluée à différents intervalles de temps.

Les résultats montrent que la concentration de cendres affecte significativement la résistance mécanique du mortier. Par exemple, à 28 jours, les échantillons avec 6% de cendres affichent la résistance en traction par flexion la plus élevée, tandis que la résistance en compression semble augmenter avec le temps pour toutes les concentrations, mais à des niveaux différents.

## Chapitre 4 : Résultats et discussions

En ce qui concerne la durabilité, les tests d'absorption d'eau par immersion et par capillarité ont été réalisés. Les résultats indiquent une augmentation de l'absorption d'eau avec l'augmentation de la concentration de cendres, bien que la relation ne soit pas linéaire. De plus, les tests de résistance aux attaques chimiques ont été effectués avec de l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) et du chlorure de sodium ( $NaCl$ ). Les données montrent que la perte de masse diminue généralement avec le temps pour toutes les concentrations de cendres, avec des concentrations plus élevées initialement entraînant une perte de masse moindre.

En conclusion, bien que la concentration M6% semble présenter des pourcentages de perte de masse plus bas sur plusieurs périodes, une évaluation complète nécessite également la considération d'autres facteurs tels que les performances mécaniques et la durabilité du mortier.

# Conclusion générale

### Conclusion générale

- Ce mémoire a exploré l'impact de la substitution partielle du ciment par des cendres de coquilles de noix sur les propriétés mécaniques et durabilité du mortier.
- L'étude a porté sur différents pourcentages de remplacement (0%, 6%, 8% et 12%) et a inclus une série d'essais rigoureux pour évaluer la consistance, la densité, la résistance en compression et en traction par flexion, ainsi que l'absorption d'eau et la résistance chimique.
  
- Les résultats montrent que l'ajout de cendres de coquilles de noix peut améliorer certaines propriétés du mortier.
- Par exemple, une substitution à hauteur de 6% a démontré une augmentation notable de la résistance à la compression et à la traction par flexion, sans compromis significatif sur la maniabilité.
- De plus, les tests d'absorption d'eau et de perte en masse due aux attaques chimiques du NaCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> indiquent une amélioration de la durabilité du mortier, suggérant une réduction de la porosité et une meilleure résistance à l'altération.
  
- Cependant, des taux de substitution plus élevés (au-delà de 8%) tendent à diminuer les performances mécaniques, probablement en raison de la dilution excessive de la matrice cimentaire. Ainsi, une substitution modérée (6%) apparaît comme une option optimale pour améliorer à la fois les propriétés mécaniques et la durabilité du mortier.
  
- En fin, cette étude propose une approche viable pour valoriser les déchets agro-industriels, tels que les coquilles de noix, dans le domaine de la construction, alignant ainsi les pratiques de construction sur les principes de durabilité et d'économie circulaire. Ces résultats ouvrent la voie à des recherches futures sur l'optimisation des formulations de mortier à base de ce type de cendres et l'exploration d'autres types de déchets organiques comme substituts du ciment.

# Remerciements

**Remerciements :**

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes et institutions qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, nous tenons à remercier chaleureusement notre directrice de mémoire, Mme. Boughamsa Wassila, pour son encadrement précieux, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de ce projet. Son expertise et ses encouragements ont été essentiels à chaque étape de cette recherche.

Nous tenons à remercier aussi les membres de jury de soutenance Pr.Dr. Hebhouh Houria et Dr. Abdelouahed Assia pour avoir examiné et débattu notre travail lors de la soutenance.

Nous remercions également Dr. Lakoui Tahar pour son aide technique et sa disponibilité. Sa contribution au laboratoire de [GENIGEOT EL HARROUCH ] a grandement enrichi ce travail.

Un grand merci à nos collègues et amis pour leur soutien moral et leurs encouragements tout au long de cette aventure académique. Leur camaraderie a rendu ce parcours plus agréable et stimulant.

Enfin, Nous sommes reconnaissants envers nos familles pour leur amour inconditionnel et leur patience. Leur soutien et leurs encouragements nous ont donné la force de mener ce projet à bien.

À tous, nous vous adressons nos sincères remerciements.

***Atietallah Mohamed Abd El Karim et Bouakkada Nadir***

# Références bibliographiques

### Reference :

- [1] BIBLIOGRAPHIE SUR LES MORTIERS univ-tiaret
- [2] Les mortiers <https://elearning-facsct.univ-annaba.dz/>
- [3] [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)
- [4] [www.arcane-industries.fr](http://www.arcane-industries.fr)
- [5] <https://www.toutsurlebeton.fr/>
- [6] <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/chimie-on-sait-enfin-beton-romains-aussi-resistant-67855/>
- [7] <https://doc.lerm.fr/lutilisation-cendres-volantes-beton/>
- [8] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Cendre\\_volante](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cendre_volante)
- [9] [http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/TP3\\_stsbat1ANALYSE\\_GRANULO\\_laboratoire\\_materiaux.pdf](http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/TP3_stsbat1ANALYSE_GRANULO_laboratoire_materiaux.pdf) ([http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/TP3\\_stsbat1ANALYSE\\_GRANULO\\_laboratoire\\_materiaux.pdf](http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/TP3_stsbat1ANALYSE_GRANULO_laboratoire_materiaux.pdf))
- [10] <http://dspace.univ-jijel.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/679/G%C3%A9o-R.M.G.E.04-19.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [11] [http://thesis.univ-biskra.dz/323/1/Geni\\_civil\\_m3\\_2009.pdf](http://thesis.univ-biskra.dz/323/1/Geni_civil_m3_2009.pdf)
- [12] <https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticlepdf/6/19/3/1993>