



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université d'Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Civil & Travaux Publics

Mémoire pour l'Obtention du diplôme de Master  
Filière : GENIE CIVIL  
Spécialité : STRUCTURE

Thème :

## Caractérisation d'un matériau d'isolation bio sourcé

**PRESENTE PAR :**

- SELLAFF WAIL
- MERABET MOHAMED EL BACHIR

**DEVANT LE JURY COMPOSE DE :**

PRESIDENT : Mme. MENAA Rabha  
EXAMINATEUR : Mme. ABDELBARI Salima  
ENCADREUR : Dr. DERBAL Ahlam

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2024/2025

## REMERCIEMENT

*Tout d'abord, nous remercions Dieu qui nous a aidés à accomplir ce modeste travail.*

*La première personne que nous voulons remercier est bien notre encadreur Mme DERBAL ahlam, pour nous avoir donné la chance de réaliser ce travail, pour son aide précieuse, pour ses conseils constructifs et pour le temps qu'il nous a consacré.*

*Nous avons été extrêmement sensibles à ses qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail. Nous tenons à remercier fortement BENTaOUZINA Nadjat, dont nous n'oublierons jamais son aide, sa présence permanente pour nous, ses conseils et son soutien moral. Nos vifs remerciements aux membres de jury, Mme MENAA.R et Mme ABDELBARIS, pour l'honneur qu'ils nous font d'examiner ce travail. Nous remercions également KEDDOU Adel et BENTOUAZINA Nadjat, ingénieurs au laboratoire de génie civil à l'université BELHADJ Bouchaïb ain temouchent. pour leurs aides durant les essais expérimentaux au laboratoire. Nous n'oublierons pas de remercier tous nos collègues et amis.*

*Enfin, nous remercions nos chers parents et familles pour leur encouragement et leur soutien. demandons à Dieu de leur donner la santé, le bien-être et une longue vie.*

## DEDICACE

Par la seule grace de dieu, j'ai pu achever ce travail, je le dedie a :

Mes chers parents, ma chère mère : MEHHALI Kheira, et mon cher père SELLAF Mohamed, la source de vie ,d'amour et d'emotion que je ne pourrai jamais les remercier assez pour tout ce qu'ils ont fait pour moi.

Mme DERBAL.A à tous ses remerciements et sa reconnaissance .

A tous mes amis et collègues de la promotion génie civil 2024-2025 en particulier la filière STRUCTURE , chacun en son nom MERABET Mohamed El Bachir, mon meilleur ami avant qu'elle ne soit mon binôme et a tous mes professeurs qui m'ont enseigne et soutenu dans ma carrière, à qui je dois un profond respect .

Enfin, un grand merci à tous ceux qui m'ont aide d'une manière ou d'une autre, cher lecteur.

**SELLAF.W**

## DEDICACE

Je dedie ce travail a ma mère GUEDOUDOU Amaria , la femme la plus merveilleuse. Grâce à elle, j'ai pu réussir mes études et avancer dans la vie, son soutien constant m'a aidé a surmonter les difficultés et a atteindre mes objectifs. Maman, sa force et son amour sont la base de ma réussite. Je prie Dieu de la bénir et de lui donner une longue vie pleine de sante et de bonheur. Merci pour tout ce qu'elle a fait et continue de faire pour ses princesses.

A mon père adore MERABET Bouhdjer , il est mon guide et mon héros. Merci pour tout ce qu'il fait pour moi , sa sagesse et sa force m'aident toujours. Que Dieu le protège pour nous ses filles et surtout sa fille tetue qui l'aime plus que tout.

Mme DERBAL.A a tous ses remerciements et sa reconnaissance.

A tous mes amis et collègues de la promotion génie civil 2024-2025 en particulier la filière STRUCTURE , chacun en son nom SELLAF

Wail, mon meilleur ami avant qu'elle ne soit mon binôme.

A tous mes professeurs qui m'ont enseigne et soutenu dans ma carrière.

Cher lecture

**MERABET.M**

# SOMMAIRE

Résumé .....	I
Introduction générale .....	II
<b>Chapitre 1 : Recherche bibliographique</b>	
1- Introduction .....	1
2- Objectif général .....	1
3- Historique de matériau d'isolation .....	1
4 - Matériaux biosourcés et liants naturels dans la construction durable .....	3
4.1- Matériaux biosourcés .....	3
4.2 - Liants naturels .....	7
5 - Principes de fabrication et propriétés des matériaux composites à base de fibres végétales et de liants naturels .....	12
5.1 - Principes de fabrication .....	12
5.2 - Propriétés des composites à base de fibres végétales .....	13
5.3 - Traitement des fibres végétales .....	16
6 - Eau de mer .....	17
6.1 - Caractéristiques de l'eau de mer .....	17
6.2 - Utilisation de l'eau de mer .....	17
7- Conclusion .....	18
<b>CHAPITRE 2 : Caractérisation des matériaux</b>	
1 - Introduction .....	19
2 - Caractérisation des matériaux .....	19
3 - L'analyse granulométrique du pouzzolane .....	19
3.1 - But de l'essai .....	19
3.2 - Mode opératoire .....	20
3.3 - Préparation de l'échantillon .....	21
4 - Masse volumique absolue .....	28
4.1 - But de l'essai .....	28

4.2 -Matériel nécessaire .....	28
4.3 -Mode opératoire .....	28
5 - La masse volumique apparente .....	31
6 - Formulation et composition .....	36
7 - Choix des constituants des matériaux élémentaires .....	36
7.1- Préparation des échantillons .....	37
8 - Caractérisation Des Différentes Compositions :.....	40
8.1 - L'état Frais :.....	40
8.2 - L'état Durci :.....	42
8.3 - La Résistance thermique de compression :.....	44
9- L'absorption d'eau : .....	47
9.1- Essai d'absorption par capillarité :.....	47
10 - CONCLUSION : .....	48
 <b>CHAPITRE 3 : Résultats et expérimentale</b>	
1- Introduction .....	49
2 - Caractérisation physiques et thermique .....	49
2.1 - Physique .....	49
2.1.1 - Mesure de la consistance des mortiers .....	49
3 - La Résistance et homogénéité de matériaux .....	50
3.1- Essai de ultrasons .....	50
3.2 - Résistance à la compression .....	52
3.3 - Résistance à la Flexion .....	54
3.3.1 - Essai de flexion en trois point .....	54
3.4 - Essai de mesure la conductivité thermique .....	56
3.5 - L'absorption d'eau .....	57
3.5.1 - Essai d'absorption par capillarité .....	57
Conclusion générale.....	61

# LISTE DES TABLEAUX

## CHAPITRE 2 : Caractérisation des matériaux

Tableau II.1 : Module finesse du 1 <sup>er</sup> échantillon (pouzzolane fin 0/3) .....	22
Tableau II.2 : Module finesse du 2 <sup>ème</sup> échantillon (pouzzolane gros 3/8) .....	23
Tableau II.3 : Module finesse du 1 <sup>er</sup> échantillon (sable gros 0/3) .....	24
Tableau II.4: Module finesse du 2 <sup>ème</sup> échantillon (sable fin 0/2) .....	25
Tableau II.5 : Module finesse du 3 <sup>ème</sup> échantillon (79,1 % du Sable gros (0/3) + 20,9 % du sable fin (0/2)) ....	26
Tableau II.6 : Résultat de classement des sables .....	28
Tableau II.7 : Résultat de masse volumique absolue .....	31
Tableau II.8 : Les résultats obtenu .....	34
Tableau II.9 : Caractéristique physiques et mécaniques du ciment utilisé.....	36
Tableau II.10 : Les quantités des constituants pour 3éprouvettes de mortier .....	37
Tableau II.11 : Quantités des constituants pour 3 éprouvettes de témoin(béton) .....	37
Tableau II.12 : Opération pour déterminer le mortier normal (témoin) .....	37

## CHAPITRE 3 : Résultats et expérimentale

Tableau III.1 : Vitesse longitudinale de propagation des ultrasons dans l'échantillon .....	50
Tableau III.2 : Résistances moyennes à la compression des mortiers étudiés à 7jour .....	52
Tableau III.3 : Résistances moyennes à la compression des mortiers étudiés à 28 jour .....	52
Tableau III.4 : Résistances moyennes à la compression des mortiers étudiés à 60 jour .....	52
Tableau III.5 : Résistances moyennes à la compression des mortiers étudiés à 90 jour .....	53
Tableau III.6 : Résistances moyennes à la compression des mortiers étudiés par les jours .....	53
Tableau III.7 : Résistances moyennes à la flexion des mortiers étudiés à 7jour .....	54
Tableau III.8 : Résistances moyennes à la flexion des mortiers étudiés à 28 jour .....	54
Tableau III.9 : Résistances moyennes à la flexion des mortiers étudiés à 60 jour .....	54
Tableau III.10 : Résistances moyennes à la flexion des mortiers étudiés à 90 jour .....	55
Tableau III.11 : Résistances moyennes à la flexion des mortiers étudiés par les jours .....	55
Tableau III.12 : Classification du Mortier .....	56

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE 2 : Caractérisation des matériaux

Figure II.1 : Courbe granulométrique (pouzzolane fin 0/3) ) .....	22
Figure II- 2 : Courbe granulométrique (pouzzolane fin 0 /2) .....	23
Figure II. 3 : Courbe granulométrique (sable gros 0 /3) .....	24
Figure II.4 : Courbe granulométrique (sable fin 0 /2) .....	25
Figure II.5 : Courbe granulométrique ( S1/S2) .....	27
Figure II.6 : Pycnomètre utilisé pour la mesure de la masse volumique absolue .....	35
Figure II.7 : Etape de pétrissage de l'échantillon .....	39
Figure II.8: Appareil l'aéromètre à mortier ( mesure de la teneur en air) .....	40
Figure II.9 : Forme finale des échantillons (produit) .....	40
Figure II.10 : Appareille de maniabilimètre .....	41
Figure II.11 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre B .....	42
Figure II.12: L'essai de compression .....	42
Figure II.13 : Présente le dispositif de flexion .....	43
Figure II.14 : L'Essai de flexion de trois point .....	43
Figure II.15 : Appareil d'auscultation sonique (Essai d'ultrason ) .....	45
Figure II.16 : Schéma simplifié de la mesure de la vitesse de son .....	45
Figure II.17 : Les étapes du principe de la conductivité thermique (CT mètre) .....	47
Figure II.18 : Essai d'absorption d'eau par capillarité des échantillons .....	48

## CHAPITRE 3 : Résultats et expérimentale

Figure III.1 : Évolution de la vitesse mesurée par ultrasons selon la durée d'essai .....	50
Figure III.2 : Évolution de la vitesse en fonction du temps d'essai par ultrason .....	51
Figure III.3 : Évolution de la résistance à la compression des différents essais au cours du jour .....	53
Figure III.4 : Évolution des résultats des essais et du témoin au cours du temps .....	55
Figure III.5 : Variation de la conductivité thermique des échantillons au fil du temps .....	56
Figure III.6 : Évolution de la conductivité thermique (K) en fonction du temps pour différents essais .....	56
Figure III.7 : La courbe d'évolution de Ca en fonction de temps (7j) .....	59
Figure III.8 : La courbe d'évolution de Ca en fonction de temps (28j) .....	59
Figure III.9 : La courbe d'évolution de Ca en fonction de temps (60j) .....	59
Figure III.10 : La courbe d'évolution de Ca en fonction de temps (90j) .....	60

## Résumé :

L'isolation thermique joue un rôle crucial dans la réduction de la consommation énergétique des bâtiments en limitant les échanges de chaleur à travers leur enveloppe. Elle repose sur l'utilisation de matériaux de construction à faible conductivité thermique, dont la fonction principale est de réduire les pertes d'énergie tout en garantissant le confort thermique des occupants. Ce travail a pour objectif principal de mener une étude expérimentale sur des échantillons de construction réalisés avec divers matériaux isolants, afin de comparer leurs performances et identifier les solutions offrant une isolation thermique optimale.

**Mot clé :** isolation thermique, Conductivité thermique, Matériaux isolants, transfert de chaleur, Confort thermique, Économie d'énergie , Étude expérimental, Comparaison de matériaux, Bâtiment durable .

## Abstract :

Thermal insulation plays a key role in reducing energy consumption in buildings by minimizing heat transfer through their envelope. It involves the use of construction materials with low thermal conductivity, primarily aimed at reducing energy losses while ensuring thermal comfort for occupants. The main objective of this study is to conduct an experimental analysis of construction samples made with various insulating materials, in order to compare their performance and identify the most effective thermal insulation solutions.

**Keyword:** thermal insulation, thermal conductivity, insulating materials, heat transfer, thermal comfort, energy saving, experimental study, comparison of materials, sustainable building.

## المخلص:

يلعب العزل الحراري دورًا حاسمًا في تقليل استهلاك الطاقة في المباني من خلال الحد من تبادل الحرارة عبر غلافها. يعتمد على استخدام مواد بناء ذات موصلية حرارية منخفضة، وظيفتها الأساسية هي تقليل خسائر الطاقة مع ضمان الراحة الحرارية للسكان. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو إجراء دراسة تجريبية على عينات البناء المصنوعة من مواد عازلة مختلفة، من أجل مقارنة أدائها وتحديد الحلول التي تقدم العزل الحراري الأمثل.

الكلمات المفتاحية : العزل الحراري، التوصيل الحراري، المواد العازلة، انتقال الحرارة، الراحة الحرارية، توفير الطاقة، الدراسة التجريبية، مقارنة المواد، البناء المستدام.

# Introduction générale

L'isolation thermique est une composante essentielle dans la conception de bâtiments énergétiquement efficaces et durables. Avec la montée des préoccupations liées au changement climatique et à la nécessité de réduire l'empreinte carbone, les matériaux biosourcés ont suscité un intérêt croissant en tant qu'alternative aux matériaux traditionnels, comme la laine de verre ou le polystyrène. Les matériaux biosourcés sont d'origine naturelle et renouvelable, et leur utilisation dans le secteur du bâtiment peut contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la conservation des ressources naturelles.

L'une des propriétés clés de ces matériaux est leur capacité à fournir une isolation thermique efficace tout en étant écologiques. Pour qu'un matériau biosourcé soit viable en tant qu'isolant, il est crucial de caractériser correctement ses propriétés thermiques, notamment sa conductivité thermique, sa résistance thermique et sa durabilité dans le temps. Ces caractéristiques dépendent largement des matériaux de base utilisés, du processus de fabrication et des conditions d'utilisation dans les bâtiments.

La caractérisation thermique des matériaux biosourcés repose sur plusieurs méthodes expérimentales et théoriques, qui permettent d'obtenir des informations sur leur performance en tant qu'isolant. Parmi les techniques utilisées, on retrouve la mesure de la conductivité thermique à l'aide d'appareils comme le "hot plate" ou la méthode de l'onde transitoire. Ces tests sont essentiels pour déterminer dans quelle mesure un matériau biosourcé peut réduire les pertes ou gains de chaleur à travers les parois d'un bâtiment et, ainsi, contribuer à une gestion énergétique optimale.

Des matériaux comme la laine de chanvre, la cellulose, la laine de mouton, et le liège sont quelques exemples de solutions biosourcées utilisées pour l'isolation thermique. Ces matériaux présentent des avantages non seulement en termes de performance thermique, mais également sur le plan de la réduction des impacts environnementaux. Cependant, leur mise en œuvre dans la construction nécessite une évaluation approfondie de leur comportement face à des facteurs tels que l'humidité, la dégradation dans le temps et la résistance au feu.

Notre mémoire est subdivisé en une introduction, chapitre sur les recherche bibliographique ,chapitre sur les caracterisation des materiaux, chapitre sur les résultats et discussion, en fin une conclusion.

Dans le chapitre 1, l'objectif est de dresser un état des lieux des matériaux utilisés dans le domaine de la construction, en mettant particulièrement l'accent sur les matériaux biosourcés et leur potentiel dans le domaine de l'isolation thermique.

Dans le chapitre 2, on présente les matériaux utilisés ainsi que la méthodologie expérimentale mise en œuvre pour l'évaluation de leurs performances. Il s'agit tout d'abord de décrire les différents composants entrant dans la formulation des échantillons, notamment les fibres végétales (algues, fibres de palmier), les liants (pouzzolane, perlite, chaux vive, ciment) et, le cas échéant, les adjuvants.

Ensuite, cette section détaille les procédures de préparation des échantillons, incluant le mélange des composants, la mise en forme (pavés, éprouvettes) ainsi que les conditions de séchage et de durcissement adoptées.

Enfin, les différents essais de caractérisation sont présentés, couvrant les propriétés physiques (densité, porosité, hygrométrie), mécaniques (résistance à la compression et à la flexion, adhérence), thermiques (conductivité et résistance thermique), acoustiques (absorption sonore) ainsi que la durabilité (résistance au feu, à l'eau, aux cycles gel-dégel).

Cette méthodologie permet d'assurer une évaluation rigoureuse et comparative des performances des matériaux étudiés, en vue d'identifier les formulations les plus adaptées à une utilisation comme isolants dans le bâtiment.

Dans le 3 chapitre est de présenter, analyser et interpréter les résultats obtenus à l'issue des essais de caractérisation réalisés sur les différents échantillons de matériaux. Les résultats sont exposés sous forme de tableaux et de graphiques afin de faciliter la lecture et la comparaison des performances.

Une attention particulière est portée à l'analyse comparative des différentes formulations, dans le but d'identifier celles qui présentent les meilleures performances selon les critères physiques, mécaniques, thermiques, acoustiques et de durabilité.

Cette partie vise également à examiner l'influence spécifique de chaque composant (fibres végétales, liants, adjuvants) sur les propriétés finales des matériaux, afin de mieux comprendre les interactions entre les constituants et leur rôle dans l'optimisation des performances.

Enfin, les résultats obtenus pour les matériaux biosourcés sont comparés à ceux d'un matériau de référence à base de ciment, afin d'évaluer leur pertinence et leur potentiel d'utilisation comme alternative durable dans le domaine de la construction.

# **CHAPITRE 1 :**

## Recherche bibliographique

## 1- Introduction :

Les matériaux biosourcés, issus de ressources renouvelables comme le bois, la paille et le chanvre, jouent un rôle clé dans la réduction des émissions de GES et le stockage du carbone, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique. Leur faible impact environnemental, leur capacité à améliorer le confort intérieur et leur soutien par la réglementation française renforcent leur adoption. Sur le plan économique, ils favorisent les circuits courts, créent des emplois locaux et répondent à une demande croissante pour des constructions écologiques. Leur certification garantit leur qualité et renforce leur compétitivité. Leur intégration dans le bâtiment représente donc une solution durable aux enjeux environnementaux et économiques.

## 2- Objective général:

L'objectif de cette recherche est de concevoir et d'évaluer un matériau d'isolation biosourcé performant et durable en analysant l'influence de ses composants sur ses propriétés physiques, mécaniques, thermiques et acoustiques. En comparant ce matériau à une référence à base de ciment, l'étude vise à identifier des formulations optimales qui allient efficacité, durabilité et faible impact environnemental.

## 3- Historique de matériau d'isolation:

L'évolution des matériaux d'isolation est un sujet riche, reflétant les avancées technologiques et les préoccupations environnementales au fil des siècles. Voici un aperçu détaillé de cette évolution.

### ➤ Les débuts de l'isolation :

Avant le 17<sup>ème</sup> siècle, les matériaux isolants utilisés étaient principalement organiques. Les civilisations anciennes recouraient à des éléments tels que la boue, la paille, et les peaux d'animaux pour isoler leurs habitations. Ces matériaux, bien que rudimentaires, offraient une certaine protection contre les intempéries<sup>7</sup>.

➤ **L'ère industrielle (19ème siècle) :**

Avec l'essor de l'industrie au 19ème siècle, l'utilisation de matériaux isolants a commencé à se diversifier. Les copeaux de bois, le liège et la laine sont devenus courants, souvent insérés dans les murs ou sous les planchers. Cependant, ce n'est qu'après la Seconde Guerre mondiale que l'on a vu un véritable changement dans la technologie de l'isolation avec l'introduction de nouveaux matériaux comme la laine de verre et la fibre de verre [13](#).

➤ **Les innovations du 20ème siècle:**

La laine de verre a été développée dans les années 1930 et est devenue un matériau phare pour l'isolation thermique grâce à ses propriétés ininflammables et sa résistance thermique supérieure. Cette période a également vu l'émergence de la mousse polyuréthane et d'autres matériaux synthétiques qui ont amélioré l'efficacité énergétique des bâtiments [17](#).

➤ **Évolution vers des matériaux écologiques:**

À partir des années 1970, en réponse aux crises énergétiques et aux préoccupations environnementales croissantes, il y a eu un intérêt renouvelé pour des matériaux d'isolation plus durables. Des options comme la cellulose recyclée, la laine de mouton et d'autres éco-matériaux ont été développées. Ces matériaux offrent non seulement une bonne performance thermique mais aussi une empreinte écologique réduite [57](#).

➤ **Caractérisation des matériaux isolants :**

La caractérisation des propriétés thermiques et mécaniques des matériaux isolants est cruciale pour optimiser leur utilisation. Des méthodes telles que l'analyse par tricouche ont été développées pour étudier des isolants légers comme les aérogels, qui présentent une porosité extrême et une faible densité [2](#). La recherche continue sur les propriétés mécaniques des isolants, notamment sous sollicitation dynamique, est essentielle pour garantir leur performance dans diverses conditions [6](#).

## 4 - Matériaux biosourcés et liants naturels dans la construction durable :

### 4.1- Matériaux biosourcés :

Les matériaux biosourcés sont issus de ressources renouvelables et jouent un rôle clé dans l'éco-construction. Parmi les principaux matériaux :

#### A. Bois :

Le bois est un matériau naturel d'origine végétale qui joue un rôle essentiel dans divers domaines, allant de la construction à l'énergie. Cette présentation aborde ses propriétés, ses utilisations et son impact environnemental

- **Propriétés du bois :**

**Résistance et durabilité :** Le bois possède une résistance mécanique élevée pour une densité relativement faible, ce qui en fait un matériau de choix pour la construction. Sa durabilité naturelle lui permet de résister aux agressions des agents atmosphériques, aux champignons lignivores et à d'autres nuisibles [16](#).

**Isolation thermique :** Le bois est un excellent isolant thermique, avec une conductivité thermique très faible. Il isole jusqu'à 6 fois mieux que la brique et 12 fois mieux que le béton, ce qui contribue à réduire les coûts de chauffage et à améliorer le confort thermique des bâtiments [35](#).

**Propriétés hygroscopiques :** Le bois a la capacité d'absorber et de libérer l'humidité, ce qui aide à réguler l'hygrométrie intérieure des bâtiments, créant ainsi un environnement sain [46](#).

**Comportement au feu :** Contrairement aux idées reçues, le bois présente une bonne résistance au feu. Sa combustion est prévisible, offrant plus de temps pour l'évacuation en cas d'incendie [5](#).

- **Utilisations du bois :**

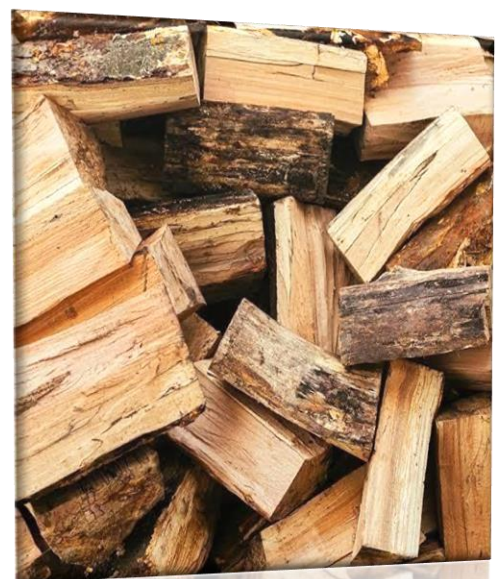
**Construction :** Le bois est largement utilisé dans la construction de maisons et d'autres structures grâce à ses propriétés isolantes et sa légèreté. Les systèmes constructifs en ossature bois permettent d'atteindre des performances énergétiques élevées tout en réduisant l'épaisseur des murs<sup>35</sup>.

**Mobilier et ébénisterie :** Le bois est également prisé pour la fabrication de meubles et d'objets décoratifs en raison de sa beauté naturelle et de sa facilité de travail.

**Énergie :** Le bois est une source d'énergie renouvelable utilisée depuis la préhistoire. Sa combustion fournit de l'énergie pour le chauffage domestique et industriel, ainsi que pour la production d'électricité<sup>78</sup>.

**Produits dérivés :** Des sous-produits du bois, tels que les sciures et les écorces, sont valorisés dans diverses industries, y compris celle du papier et des panneaux de particules<sup>24</sup>.

- **Impact environnemental:** Le bois est considéré comme un matériau durable, car il est renouvelable et peut stocker du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) pendant sa croissance. Une maison bien isolée en bois peut stocker jusqu'à 20 tonnes de CO<sub>2</sub>, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique<sup>4</sup>. Cependant, il est essentiel d'assurer une gestion forestière durable pour préserver les écosystèmes forestie.



## B. La paille:

La paille est un matériau de construction biosourcé qui a gagné en popularité en raison de ses propriétés écologiques, techniques et économiques. Voici un aperçu détaillé de ses caractéristiques et de ses applications.

- **Propriétés de la paille :**

**Biodégradabilité et renouvelabilité :** La paille est entièrement biodégradable et renouvelable, ce qui en fait un choix respectueux de l'environnement. Elle est généralement issue de cultures céréalières comme le blé, l'orge ou le seigle<sup>2</sup>.

**Isolation thermique :** La paille possède d'excellentes propriétés isolantes, avec une résistance thermique pouvant atteindre  $8,8 \text{ m}^2\text{K/W}$ , ce qui permet une réduction significative des besoins en chauffage<sup>6</sup>. Elle offre également une bonne isolation acoustique<sup>4</sup>.

**Régulation de l'humidité :** En tant que matériau perspirant, la paille permet une bonne circulation de l'air tout en régulant l'humidité à l'intérieur des bâtiments, créant ainsi un environnement intérieur sain<sup>7</sup>.

**Résistance au feu :** Bien que la paille soit inflammable, elle présente une bonne résistance au feu si elle est correctement compactée et protégée par des enduits appropriés<sup>4</sup>.

- **Applications de la paille :**

**Construction de murs porteurs :** La technique Nebraska, développée dans les années 1980, utilise des bottes de paille comme murs porteurs sans structure en bois. Cette méthode a été adoptée pour divers types de bâtiments, y compris des maisons individuelles et des immeubles collectifs<sup>2</sup>.

**Isolation :** La paille est utilisée comme isolant dans les constructions à ossature bois, ainsi que dans les rénovations d'immeubles existants. Elle peut être intégrée dans les murs extérieurs ou intérieurs pour améliorer l'efficacité énergétique<sup>5</sup>.

**Revêtements :** Les murs en paille peuvent être recouverts d'enduits à base d'argile ou de chaux qui assurent à la fois protection contre l'humidité et finition esthétique. Ces enduits sont également perméables à la vapeur d'eau, ce qui contribue au confort hygrothermique.



### C. Le chanvre :

Le chanvre est un matériau de construction biosourcé qui connaît un regain d'intérêt en raison de ses propriétés écologiques et techniques. Voici un aperçu des caractéristiques du chanvre et de ses diverses applications dans le secteur de la construction.

- **Propriétés du chanvre :**

**Isolation thermique et acoustique :** Le chanvre est reconnu pour ses excellentes propriétés isolantes, tant thermiques qu'acoustiques. Sa capacité à réguler la température permet de conserver la chaleur en hiver et de maintenir la fraîcheur en été, ce qui contribue à réduire les besoins en chauffage et en climatisation [13](#).

**Durabilité :** Le chanvre est naturellement résistant aux insectes, aux rongeurs et à l'humidité, ce qui en fait un matériau durable pour la construction. De plus, il ne nécessite pas l'utilisation de pesticides toxiques, favorisant ainsi des habitats plus sains [34](#).

**Légèreté :** Comparé à d'autres matériaux comme le béton, le chanvre est beaucoup plus léger, facilitant son transport et son utilisation dans des constructions à ossature bois [1](#).

**Impact environnemental :** En tant que plante, le chanvre absorbe une quantité significative de CO<sub>2</sub> durant sa croissance. Utilisé comme matériau de construction, il continue à fixer du CO<sub>2</sub>, contribuant ainsi à la réduction des émissions de gaz à effet de serre [34](#)

- **Applications du chanvre :**

**Laine de chanvre :** Utilisée sous forme de rouleaux ou de panneaux semi-rigides, la laine de chanvre est idéale pour l'isolation des murs, des toits et des sols. Elle peut également être mélangée avec d'autres matériaux pour renforcer sa cohésion<sup>12</sup>.

**Béton de chanvre :** Ce matériau innovant est un mélange de chènevotte (partie ligneuse de la tige de chanvre) et de chaux. Le béton de chanvre est utilisé pour créer des murs isolants et légers, offrant une excellente efficacité énergétique. Il peut être projeté sur des structures existantes ou utilisé dans des coffrages<sup>14</sup>.

**Blocs de chanvre :** Ces blocs sont composés principalement de chènevotte et sont utilisés pour renforcer l'isolation thermique intérieure (ITI) ou extérieure (ITE) des bâtiments. Ils sont compatibles avec divers types d'ossatures, notamment en bois ou en acier<sup>12</sup>.

**Revêtements et finitions:**Le chanvre peut également être utilisé dans les enduits et les revêtements muraux pour améliorer l'esthétique tout en conservant ses propriétés isolantes <sup>3</sup>.



#### 4.2 - Liants naturels :

Les liants naturels tels que la pouzzolane, la perlite et la chaux vive sont essentiels pour stabiliser et améliorer les propriétés des matériaux de construction :

**A. Pouzzolane :** La pouzzolane est une roche volcanique naturelle qui possède plusieurs propriétés intéressantes, ce qui en fait un matériau polyvalent dans divers domaines, notamment la construction et le jardinage. Voici un aperçu de ses caractéristiques et de ses applications.

- **Propriétés de la pouzzolane :**

**Composition chimique :** La pouzzolane est principalement composée de silice (environ 45%), d'alumine (15%) et d'oxyde de fer (15%), avec un pH neutre, ce qui signifie qu'elle n'acidifie pas le sol<sup>12</sup>.

**Porosité et légèreté :** Sa structure alvéolaire lui confère une forte porosité et une faible densité, ce qui permet une bonne rétention d'eau tout en étant suffisamment légère pour faciliter son transport <sup>14</sup>.

**Isolation thermique et phonique :** La pouzzolane offre également des propriétés d'isolation thermique et phonique, ce qui en fait un choix idéal pour des applications nécessitant une réduction du bruit ou des variations de température<sup>13</sup>.

**Résistance aux intempéries :** Elle est imputrescible, ne se dégrade pas avec le temps et résiste bien aux conditions climatiques extrêmes, y compris le gel <sup>24</sup>.

- **Utilisations de la pouzzolane :**

- **Construction :**

**Mortiers et bétons :** Utilisée dans la fabrication de mortiers et de bétons drainants, la pouzzolane améliore les performances mécaniques des matériaux tout en permettant une évacuation rapide de l'eau<sup>46</sup>.

**Parpaings :** Elle est souvent intégrée dans la composition des parpaings pour améliorer leur légèreté et leur isolation<sup>4</sup>.

- **Jardinage :**

**Paillage :** La pouzzolane est largement utilisée comme paillage pour protéger les racines des plantes contre le froid, limiter l'évaporation de l'eau et prévenir la croissance des mauvaises herbes<sup>35</sup>.

**Drainage :** Son utilisation dans les substrats pour plantes en pot (comme les bonsaïs) assure un bon drainage au niveau racinaire, ce qui est essentiel pour la santé des plantes<sup>24</sup>.

- **Aménagement paysager :**

**Éléments décoratifs :** En plus de ses applications fonctionnelles, la pouzzolane est également utilisée comme matériau décoratif dans les jardins, apportant une touche esthétique grâce à ses couleurs variées (noire ou rouge) et sa texture unique<sup>235</sup>.

**Filtration et épuration :** Grâce à sa capacité à filtrer les eaux, elle est utilisée dans des systèmes d'épuration des eaux usées ou dans les bassins de lagunage pour améliorer la qualité de l'eau<sup>14</sup>.



## B. Le perlite:

La perlite est une roche volcanique amorphe qui, lorsqu'elle est chauffée à haute température, se dilate et se transforme en un matériau léger et poreux. Voici un aperçu de ses propriétés et de ses applications.

- **Propriétés de la perlite :**

**Légèreté :** La perlite expansée a une densité très faible (environ 65-68 lb/pi<sup>3</sup>), ce qui facilite son transport et sa manipulation dans diverses applications [6](#).

**Isolation thermique :** Avec une conductivité thermique allant de 0,04 à 0,06 W/(m·K), la perlite est un excellent isolant thermique, utilisée pour réduire les pertes de chaleur dans les bâtiments [56](#).

**Résistance au feu :** Classée Euroclasse A1, la perlite est incombustible et peut être utilisée dans des environnements à haute température sans risque d'inflammation [56](#).

**Porosité :** Sa structure poreuse lui permet d'absorber jusqu'à 40% de son volume en eau, ce qui en fait un bon choix pour des applications nécessitant une rétention d'humidité [53](#).

**Neutralité chimique :** La perlite a un pH neutre (entre 6,8 et 7,2) et est chimiquement inerte, ce qui la rend adaptée à des applications en contact avec des substances réactives ou alimentaires [45](#).

**Durabilité :** Elle ne se dégrade pas avec le temps et résiste bien aux intempéries, aux insectes et aux rongeurs [56](#).

- **Utilisations de la perlite :**

- **Construction :**

**Isolation :** Utilisée comme matériau isolant dans les murs, les toits et les planchers pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. o **Mortiers légers :** Incorporée dans des mélanges de mortier pour alléger le poids tout en conservant des performances mécaniques adéquates.

- **Horticulture :**

**Substrat de culture :** La perlite est souvent mélangée avec d'autres substrats pour améliorer le drainage et l'aération des racines des plantes. Elle favorise également une meilleure rétention d'eau sans saturer le sol<sup>34</sup>.

**Hydroponie :** En tant que matériau de culture en hydroponie, elle aide à stabiliser les racines tout en permettant une bonne circulation de l'air.

- **Filtration :**

Utilisée dans les systèmes de filtration pour l'industrie chimique, pharmaceutique et alimentaire grâce à sa structure poreuse qui permet une filtration efficace sans contamination<sup>12</sup>.



### C. Le chaux vive :

La chaux vive, également connue sous le nom d'oxyde de calcium (CaO), est un matériau largement utilisé dans divers secteurs, notamment la construction, l'agriculture et le jardinage. Voici un aperçu de ses propriétés et de ses applications.

- **Propriétés de la chaux vive**

**Réaction exothermique :** Lorsqu'elle est mélangée à de l'eau, la chaux vive libère de la chaleur dans une réaction exothermique. Cette propriété est utilisée pour des applications nécessitant une déshydratation rapide.

**pH élevé :** La chaux vive a un pH alcalin élevé, ce qui lui confère des propriétés désinfectantes et antiseptiques. Elle peut neutraliser les acides et aider à équilibrer l'acidité des sols.

**Légèreté et malléabilité :** En tant que matériau léger, la chaux vive est facile à manipuler et à appliquer dans diverses formulations.

**Propriétés antifongiques et insecticides :** Elle est efficace pour éradiquer les champignons, les larves d'insectes et d'autres nuisibles, ce qui en fait un traitement préventif et curatif dans le jardinage.

- **Utilisations de la chaux vive**

- **Construction :**

**Mortiers et enduits :** La chaux vive est utilisée pour fabriquer des mortiers et des enduits qui permettent une bonne perméabilité à la vapeur d'eau, favorisant ainsi un environnement intérieur sain.

**Stabilisation des sols :** Dans les projets de génie civil, elle est utilisée pour stabiliser les sols argileux en réduisant leur humidité et en améliorant leur portance.

- **Agriculture et jardinage :**

**Amendement du sol :** La chaux vive est appliquée pour corriger l'acidité des sols, favorisant ainsi une meilleure absorption des nutriments par les plantes.

**Protection des cultures :** Elle désinfecte les troncs des arbres fruitiers et lutte contre divers parasites et maladies (comme la tavelure ou le chancre) en stoppant leur prolifération.

**Désinfection :** Utilisée pour éliminer les mousses et lichens sur les surfaces végétales.

**- Industrie :**

**Traitement des eaux usées :** La chaux vive est utilisée pour neutraliser les acides dans les processus de traitement des eaux usées.

**Fabrication de produits chimiques :** Elle sert de matière première dans la production de divers produits chimiques industriels.



## **5 - Principes de fabrication et propriétés des matériaux composites à base de fibres végétales et de liants naturels :**

Les matériaux composites à base de fibres végétales et de liants naturels sont de plus en plus utilisés dans divers secteurs en raison de leur durabilité, de leur légèreté et de leur impact environnemental réduit. Voici un aperçu des principes de fabrication et des propriétés de ces matériaux.

### **5.1 - Principes de fabrication :**

#### **A. Sélection des matières premières :**

Les composites sont généralement fabriqués à partir de fibres végétales telles que le lin, le chanvre, la jute ou d'autres plantes ligno-cellulosiques. Ces fibres sont souvent issues des parties moins valorisées des plantes, ce qui permet d'optimiser l'utilisation des ressources agricoles<sup>12</sup>.

**B. Préparation des fibres :**

Avant la fabrication, les fibres doivent être préparées par des étapes telles que le nettoyage, le broyage et la séparation. Cette préparation vise à améliorer l'adhérence entre les fibres et le liant, ce qui est crucial pour les propriétés mécaniques finales du composite [3](#).

**C. Choix du liant :**

Les liants utilisés peuvent être d'origine naturelle (comme la chaux, la caséine ou des biopolymères) ou synthétique (comme les résines époxy). Les liants naturels sont souvent privilégiés pour leur biodégradabilité et leur faible impact environnemental [14](#).

**D. Techniques de mise en œuvre :**

Différentes techniques peuvent être employées pour fabriquer des composites à base de fibres végétales :

- **Thermocompression** : Cette méthode consiste à chauffer le mélange de fibres et de liant sous pression pour former des plaques ou des panneaux.
- **Procédé autolié** : Utilisé pour fabriquer des feutres ou des composites sans ajout de liant supplémentaire, en exploitant les propriétés adhésives naturelles des fibres [1](#).
- **Moulage** : Les fibres sont mélangées avec le liant et moulées dans une forme spécifique avant d'être durcies par traitement thermique ou chimique [2](#).

**5.2 - Propriétés des composites à base de fibres végétales :****A. Propriétés mécaniques :**

- **Résistance** : Les composites à base de fibres végétales présentent une résistance mécanique comparable à celle des composites traditionnels en fibre de verre, tout en étant plus légers (20 à 30 % plus légers) [25](#).
- **Flexibilité** : La nature organique des fibres permet une certaine flexibilité, rendant ces matériaux adaptés à diverses applications.

**B. Propriétés thermiques et acoustiques :**

- **Isolation thermique** : Les composites offrent d'excellentes propriétés d'isolation thermique, ce qui les rend appropriés pour les applications dans le bâtiment [1](#).
- **Isolation acoustique** : Grâce à leur structure poreuse, ces matériaux peuvent également atténuer le bruit, ce qui est bénéfique dans les environnements urbains.

**C. Durabilité et impact environnemental :**

- **Biodégradabilité** : Les composites fabriqués avec des liants naturels sont souvent biodégradables, réduisant ainsi l'impact environnemental à la fin de leur cycle de vie.
- **Recyclabilité** : La présence de fibres naturelles facilite le recyclage des composites, permettant une valorisation après usage<sup>4</sup>.

**Les dattiers :**

Les fibres du palmier dattier sont des fibres d'origine végétale, obtenues principalement à partir des palmes, de la gaine foliaire et parfois du tronc de l'arbre. Utilisées depuis des siècles dans les objets artisanaux, ces fibres attirent aujourd'hui l'intérêt de l'industrie pour leur caractère écologique, leur solidité et leur faible poids.

**• Utilisations du dattier :**

- Matériau naturel local
- Le tronc du dattier, riche en fibres, peut être utilisé comme élément de construction léger (poutres, poteaux, charpentes) dans les zones rurales ou désertiques.
- Ressource renouvelable et disponible localement, idéale pour des constructions durables à faible empreinte carbone.
- Renforcement des sols
- Le système racinaire du dattier aide à stabiliser les sols, réduisant l'érosion et la désertification.
- Utilisé dans des projets de lutte contre l'érosion ou pour la fixation des dunes de sable.
- Création de microclimats pour l'habitat.
- Les palmeraies créent des zones ombragées, réduisant la température ambiante, ce qui peut diminuer les besoins en climatisation des bâtiments.
- Favorise l'aménagement bioclimatique dans les régions chaudes.
- Valorisation des déchets.
- Les résidus du dattier (palmes, fibres, noyaux) peuvent être recyclés en matériaux composites, isolants naturels, ou même en béton allégé.

- Intégration dans l'économie circulaire du bâtiment.
- Support pour l'architecture vernaculaire
- Utilisé dans les techniques traditionnelles de construction (toitures en palmes, murs en torchis armés avec fibres de palmier), contribuant à la préservation du patrimoine architectural local.
- Durabilité et résistance
- Bien que le bois de palmier ne soit pas aussi solide que les bois classiques, il présente une bonne flexibilité, une résistance aux insectes après traitement, et une durée de vie convenable dans des structures temporaires ou secondaires.

### **- Les algues :**

Les fibres d'algues sont des matériaux d'origine naturelle obtenus à partir d'algues marines, en particulier les algues brunes telles que les laminaires. Par un processus d'extraction, on isole notamment l'acide alginique, qui est ensuite converti en alginates, des composés pouvant être transformés en fibres. Ces fibres peuvent être utilisées seules ou incorporées dans des matériaux composites. Issues d'une ressource marine abondante et renouvelable, les fibres d'algues présentent l'avantage d'être biodégradables et respectueuses de l'environnement, ce qui en fait un choix prometteur pour les applications dans la construction durable et les écomatériaux.

#### **• Propriétés des algues :**

- Légèreté
- Les fibres d'algues sont très légères, ce qui en fait un excellent matériau pour les bétons allégés ou les panneaux composites.
- Bonne capacité d'absorption
- Elles peuvent retenir l'eau jusqu'à plusieurs fois leur poids, ce qui est utile pour réguler l'humidité dans les matériaux de construction.
- Biodégradabilité
- 100 % écologiques et compostables, elles s'intègrent parfaitement dans des projets de construction durables.

- **Propriétés isolantes :**

- Bonnes performances en isolation thermique et acoustique, comparables à celles de certaines fibres végétales terrestres.
- Résistance modérée.
- Moins résistantes mécaniquement que les fibres de verre ou de carbone, mais suffisantes pour des applications non structurelles ou comme renfort secondaire.
- Inertie chimique.
- Les alginates sont chimiquement stables, notamment en milieu alcalin, ce qui est un atout dans les matériaux cimentaire.

- **Utilisations des fibres d'algues :**

- **Bétons et mortiers renforcés :**

Utilisées comme renfort naturel pour améliorer la ductilité, la résistance à la fissuration et la tenue à la traction des matériaux.

- **Matériaux composites biosourcés :**

Intégrées dans des matrices polymères ou à base de chaux pour produire des matériaux de construction durables (panneaux, briques, blocs).

- **Isolants écologiques :**

Utilisées sous forme de nattes ou de fibres en vrac pour l'isolation thermique et phonique des bâtiments.

- **Revêtements respirants :**

Employées dans des enduits naturels pour créer des revêtements respirants, capables de réguler l'humidité intérieure.

- **Géotextiles biodégradables :**

Fabrication de toiles ou tapis de contrôle de l'érosion.

### **5.3 - Traitement des fibres végétales :**

Les fibres végétales doivent être modifiées par divers traitements (physiques, chimiques ou thermiques) afin de garantir leur stabilité, d'améliorer leur adhésion à la matrice minérale, et d'assurer une meilleure résistance dans le temps."

- a. **Traitement physique :**

- Séchage : pour réduire l'humidité (évite les moisissures).
    - Décorticage / défibrage : séparation des fibres longues.
    - Broyage / découpe : réduction à une taille uniforme selon l'usage.

**b. Traitement chimique :**

- Alcalinisation (NaOH) : Le NaOH permet de nettoyer la surface des fibres et enlève des composants non cellulose avec utilisation d'une porssantage.

- Traitement à l'acide : utilisé pour nettoyer la fibre (rarement utilisé seul).

Acétylation ou silane coupling agents : pour augmenter la résistance à l'eau.

- Traitement à la chaux : pour préadapter la fibre à l'environnement alcalin.

**c. Traitement thermique :**

Utilisé pour modifier et améliorer leur durabilité, leur stabilité dimensionnelle et leur résistance à l'humidité et biodégradables et respectueux de l'environnement.

**6- Eau de mer :**

L'eau de mer est l'eau salée des mers et des océans de la Terre. On dit qu'elle est « salée » parce qu'elle contient des substances dissoutes, les sels, constitués d'ions, principalement des ions halogénures comme l'ion chlorure et des ions alcalins comme l'ion sodium.

On trouve 30 à 40 g de sels dissous pour 1 kg d'eau de mer. L'eau salée s'oppose à l'eau douce, qui contient moins de 1 g de sels dissous par kilogramme. La masse volumique de l'eau de mer à la surface est d'environ 1,025 g/ml, supérieure de 2,5 % à celle de l'eau douce (1 g/ml) à cause de la masse du sel et de l'électrostriction [3]. Le tableau I.1 représente la répartition en volume et en pourcentage des différentes sources d'eau salée et d'eau douce présentes sur terre.

**6.1- Caractéristiques de l'eau de mer :**

- Composition chimique : salinité (~35 g/L), ions agressifs ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ).
- Propriétés physico-chimiques : pH, conductivité, densité.
- Impacts sur les matériaux de construction : corrosion, efflorescence, attaque chimique.
- Problèmes liés à l'utilisation directe dans le béton et les structures métalliques.

**6.2- Utilisation de l'eau de mer :****A. Dans le béton :**

- Possibilité d'utiliser l'eau de mer dans le béton non armé (en milieu côtier).
- Inconvénients : corrosion accélérée des armatures en acier.
- Recherches sur l'ajout d'inhibiteurs de corrosion, enrobages spéciaux, fibres polymères.

**B. Refroidissement d'installations industrielles :**

- Centrales thermiques, cimenteries : usage massif d'eau de mer pour le refroidissement.
- Gestion thermique et conception des échangeurs.

**C. Travaux maritimes et côtiers**

- Constructions portuaires, digues, épis, plateformes offshore.

**7- Conclusion:**

En somme, la caractérisation des matériaux d'isolation biosourcés révèle leur potentiel significatif pour améliorer l'efficacité énergétique tout en respectant l'environnement. Leur intégration dans les pratiques de construction moderne représente une avancée vers une construction durable et responsable. Les recherches futures devraient continuer à explorer l'optimisation de leurs performances et à élargir leurs applications pour répondre aux défis contemporains du secteur du bâtiment.

# **CHAPITRE 2 :**

## **Caractérisation des matériaux**

## 1 - Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons explorer les propriétés des divers composants utilisés dans la formulation et la fabrication du béton incorporant des fibres végétales et des liants naturels. Les composants de base d'un béton à base de fibres végétales et de liants naturels sont variés et jouent un rôle crucial dans les propriétés mécaniques et environnementales du matériau ces matériaux répondant à des avis techniques pour une utilisation dans le béton par l'application de quelques essais tels que : 'équivalent de sable; masse volumique (apparent / absolu); analyse granulométrie.

## 2 - Caractérisation des matériaux :

Dans cette étude nous avons utilisé pouzzolane(0/3) et (3/8) à partir matériaux de construction de université.

## 3 - L'analyse granulométrique du pouzzolane :

L'analyse granulométrique de la pouzzolane est essentielle pour évaluer ses propriétés physiques et son adéquation dans diverses applications, notamment en construction et en fabrication de ciments.

### 3.1 - But de l'essai :

- **Détermination de la Taille et du Pourcentage en Poids des Granulats :** Cet essai permet d'identifier la distribution des tailles des grains dans un échantillon de pouzzolane. En mesurant les différentes fractions granulométriques, on peut évaluer la composition du matériau.
- **Traçage de la Courbe Granulométrique :** Les résultats de l'analyse sont représentés graphiquement sous forme de courbe granulométrique. Cette représentation visuelle facilite la compréhension de la distribution des tailles et permet d'identifier les proportions relatives des différentes fractions.
- **Calcul du Module de Finesse :** Ce coefficient est essentiel pour évaluer la qualité de la pouzzolane. Un bon matériau pouzzolanique présente un module de finesse compris entre 2,2 et 2,8. Ce calcul aide à déterminer si la pouzzolane répond aux normes requises pour son utilisation.

Ces objectifs garantissent que la pouzzolane respecte les spécifications nécessaires pour son intégration dans divers projets de construction et d'ingénierie, assurant ainsi sa performance et sa durabilité dans les applications souhaitées.

### 3.2 - Mode opératoire :

L'analyse granulométrique de la pouzzolane est une méthode standardisée qui permet d'évaluer la répartition des tailles des grains. Voici les étapes principales à suivre pour réaliser cet essai :

**A. Préparation de l'Échantillon :** Pour prélever un échantillon représentatif de pouzzolane, il est nécessaire que sa masse soit supérieure ou égale à  $0,2 \times D$ , où  $D$  représente le diamètre du plus gros granulât. Cette exigence garantit que l'échantillon soit représentatif de l'ensemble du matériau. Ensuite, il est recommandé de sécher le sable à une température maximale de  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  dans une étuve afin d'éliminer toute humidité résiduelle.

**B. Installation des tamis :** Pour l'installation des tamis, commencez par disposer une série de tamis avec des mailles de tailles décroissantes. Les dimensions des tamis doivent être les suivantes : (5mm : 3,15 mm: 2,5 mm: 1,25 mm: 0,63 mm: 0,315 mm: 0,16 mm: 0,08 mm). Placez le tamis le plus grand en haut de la colonne et le plus petit en bas. Cette configuration garantit un tri efficace des particules selon leur taille.

**C. Tamisage :** Versez l'échantillon de pouzzolane sur le tamis supérieur. Soumettez ensuite les tamis à des vibrations, soit à l'aide d'une machine à tamiser, soit manuellement, pendant une durée de 5 minutes. Après ce processus, collectez les matériaux retenus sur chaque tamis, appelés "refus", ainsi que ceux qui passent à travers, désignés sous le terme de "tamisât".

**D. Pesée et calculs :** Pesez chaque fraction obtenue sur les tamis et enregistrez les résultats. Calculez ensuite les refus cumulés ainsi que les pourcentages cumulés de tamisât pour chaque taille de grain. Enfin, déterminez le module de finesse de la pouzzolane en appliquant la formule appropriée.

**E. Tracé de la courbe granulométrique :** Représentez graphiquement les pourcentages cumulés de tamisât en fonction des dimensions des mailles sur une feuille semi-logarithmique. Sur l'axe des abscisses, indiquez les dimensions des mailles en utilisant une échelle logarithmique, tandis que sur l'axe des ordonnées, placez les pourcentages cumulés en échelle arithmétique. Cette représentation permettra d'analyser la distribution granulométrique de manière efficace.

**F. Interprétation des résultats :** Pour évaluer la distribution des tailles et déterminer si la pouzzolane est adaptée à son utilisation prévue, il est nécessaire d'analyser la forme de la courbe granulométrique.

Cette analyse permettra d'identifier les proportions de différentes tailles de grains et d'évaluer si la granulométrie répond aux exigences spécifiques pour les applications envisagées.



### 3.3 - Préparation de l'échantillon :

La quantité à utiliser doit répondre à différents impératifs qui sont contractoires :

- Il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif.
- Il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants . D'après la norme de la pratique, la masse à utiliser sera telle que :  $M \geq 0,2$  avec  $M$ , masse de l'échantillon en kg et  $D$  le diamètre  $d_y$  plus gros granulat exprimé en mm.

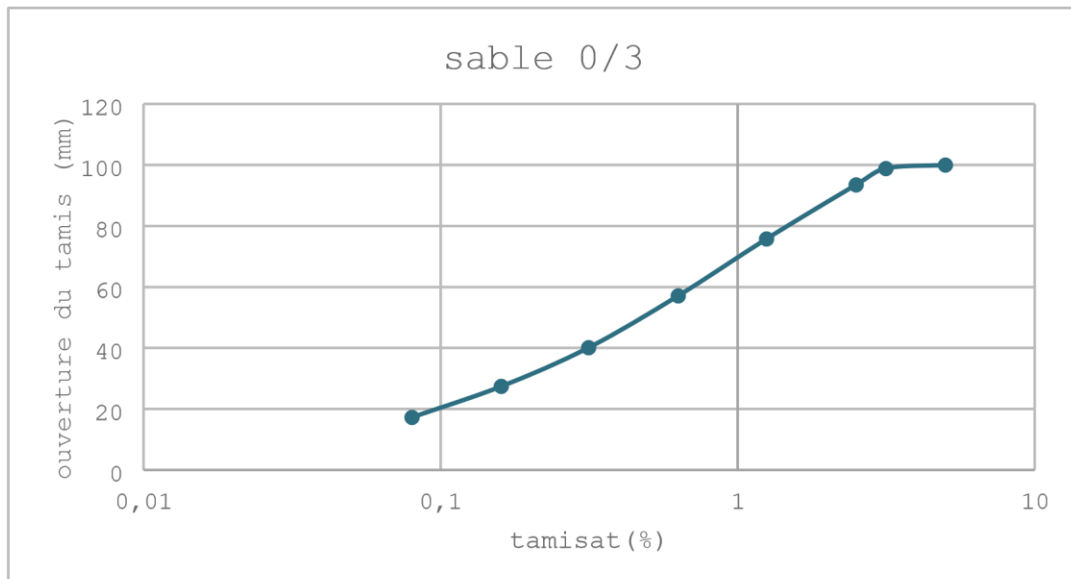
- Premier échantillon : 100% du sable (pouzzolane) fin (0/3) .
- Deuxième échantillon : 100% du pouzzolane gros (3/8).

**Premier échantillon (100% du sable(pouzzolane) fin (0/3) ) :**

Analyse granulométrique par tamisage NF P18-560				
Masse de l'échantillon (M1)			1000g	
Ouverture du tamis (mm)	Refus partiels Ri (g)	Refus cumulés Rn (g)	% r.c RC=100.Rn/M1	% du Tamisas.c Tc=100-Rc
5	0	0	0	100
3,15	11,06	11,06	1,106	98,894
2,5	54,22	65,28	6,528	93,472
1,25	177,06	242,34	24,234	75,766
0,63	186,88	429,22	42,922	57,078
0,315	169,64	598,86	59,886	40,114
0,16	127	725,86	72,586	27,414
0,08	101,42	827,28	82,728	17,272
Fond	171,56	998,84	99,884	0,116

Module de finesse du sable (pouzzolane):  $M_f = 2,07$

**TableauII.1 :** Module finesse du 1 er échantillon (pouzzolane fin 0/3).



**FigureII.1 :** Courbe granulométrique (pouzzolane fin 0/3).

**- Interprétation des résultats de l'analyse granulométrique de la pouzzolane 0/3 mm :**

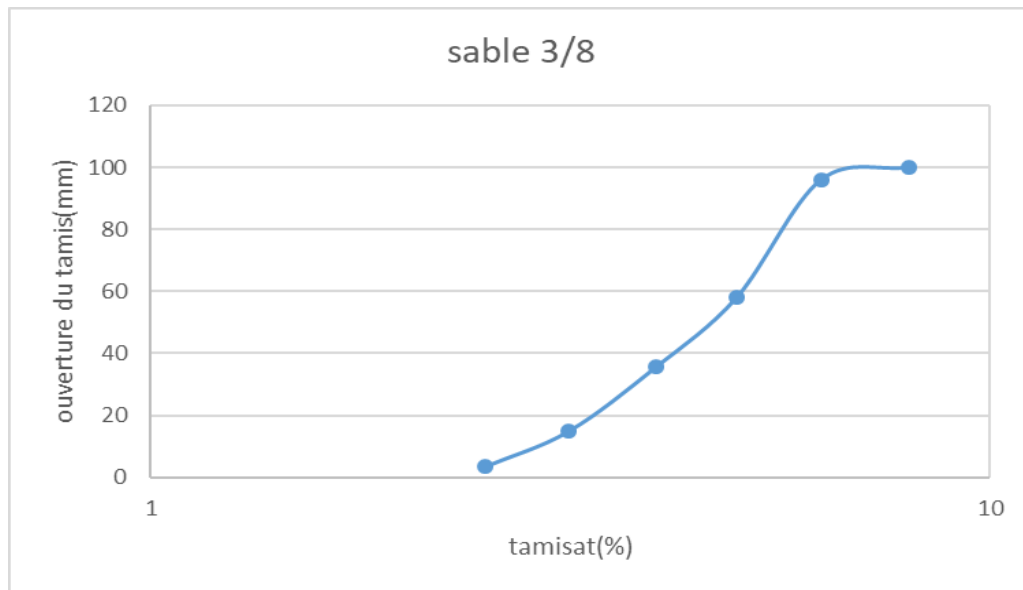
L'analyse granulométrique par tamisage, réalisée conformément à la norme NF P18560, permet de caractériser la répartition des dimensions des particules composant l'échantillon de pouzzolane 0/3 mm. Le tableau des résultats ci-joint a servi de base à l'élaboration du graphique présenté précédemment.

Le graphique illustre la courbe de tamisage obtenue à partir de la colonne “% du tamisat cumulé (Tc = 100 - Rc)” du tableau. Cette courbe présente une pente régulière, traduisant une distribution granulométrique continue et bien étalée, typique d’un matériau bien gradué.

**2ème échantillon 100% de pouzzolane gros (3/8) :**

Analyse granulométrique par tamisage NF P18-560				
Masse de l'échantillon (M1)			1000g	
Ouverture du tamis (mm)	Refus partiels Ri (g)	Refus cumulés Rn (g)	% r.c RC=100.Rn/M1	% du Tamisat.c Tc=100-Rc
8	39,3	0	0	100
6,3	378,4	39,3	3,93	96,07
5	226,48	417,7	41,77	58,23
4	206,42	644,18	64,418	35,582
3,15	115	850,6	85,06	14,94
2,5	4,95	965,6	96,56	3,44
Fond	32,04	970,55	97,055	2,945

**TableauII.2 :** Module finesse du 2 ème échantillon (pouzzolane gros 3/8).



**FigureII- 2 :** Courbe granulométrique (pouzzolane fin 0 /2).

**Analyse granulométrique du sable 3/8 mm :**

L’analyse granulométrique réalisée selon la norme NF P18-560 montre que le sable 3/8 mm présente une distribution continue et bien étalée des grains. La courbe de tamisage, obtenue à partir du pourcentage de tamisât cumulé, affiche une pente régulière, signe d’un matériau bien gradué.

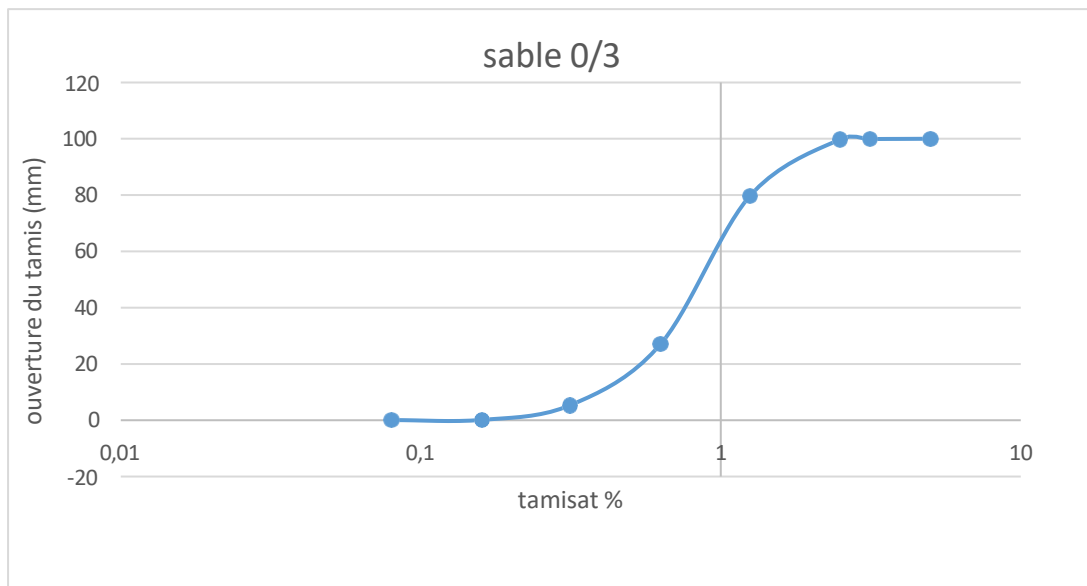
Ce type de sable offre une bonne compacité, favorable à une utilisation en béton, mortier ou fondation, car il limite les vides et améliore la cohésion du mélange.

**1er échantillon 100% du sable gros (0/3) :**

Analyse granulométrique par tamisage NF P18-560				
Masse de l'échantillon (M1)			1000g	
Ouverture du tamis (mm)	Refus partiels Ri (g)	Refus cumulés Rn (g)	%R.c RC=100*Rn%M1	% du Tamisas.c Tc=100-Rc
5	0	0	0	100
3,15	0,89	0,89	0,089	99,911
2,5	1,05	1,94	0,194	99,806
1,25	201,2	203,14	20,314	79,686
0,63	526,45	729,59	72,959	27,041
0,315	216,93	946,52	94,652	5,348
0,16	52,2	998,72	99,872	0,128
0,08	0,68	999,4	99,94	0,06
Fond	0,1	999,5	99,95	0,05

Module de finesse du sable :  $M_f = 2.88$

**Tableau II.3 :** Module finesse du 1<sup>er</sup> échantillon (sable gros 0/3)



**Figure II. 3 :** Courbe granulométrique (sable gros 0 /3) .

**Analyse granulométrique du sable 0/3 mm :**

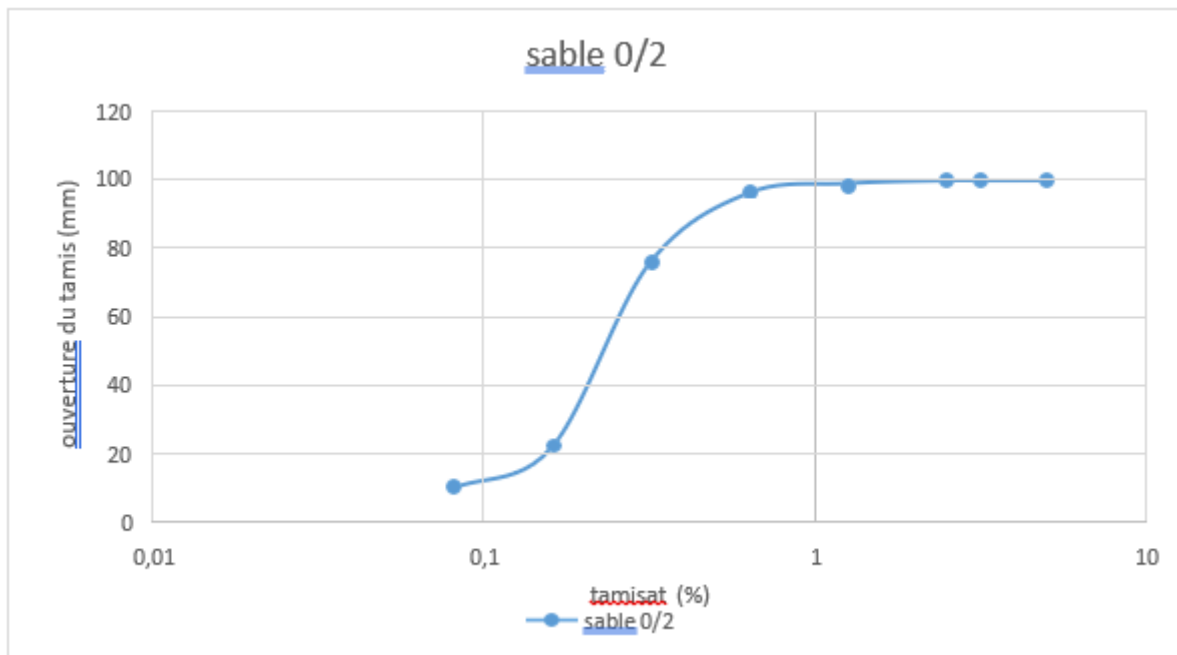
Le graphe montre que le sable 0/3 est principalement composé de grains de taille moyenne, avec très peu de fines ou de gros grains. Sa bonne répartition granulométrique le rend idéal pour les applications en construction comme le béton et le mortier.

**2ème échantillon 100% du sable fin (0/2) :**

Masse de l'échantillon (M1)		1000g		
Ouverture du tamis (mm)	Refus partiels Ri (g)	Refus cumulés Rn (g)	%R.c RC=100*Rn%M1	% du Tamis.c Tc=100-Rc
5	0	0	0	100
3,15	0,05	0,05	0,005	99,995
2,5	0,07	0,12	0,012	99,988
1,25	8,46	8,58	0,858	99,142
0,63	28	36,58	3,658	96,342
0,315	206,95	243,53	24,353	75,647
0,16	535,13	778,66	77,866	22,134
0,08	118,8	897,46	89,746	10,254
Fond	100,5	997,97	99,796	0,204

Module de finesse du sable : Mf = 1,06

**TableauII.4:** Module finesse du 2ème échantillon (sable fin 0/2)



**FigureII.4 :** Courbe granulométrique (sable fin 0 /2)

**Analyse granulométrique du sable 0/2 mm :**

Le sable 0/2, selon sa courbe granulométrique, contient principalement des grains entre 0,1 mm et 2 mm, avec peu de fines ou de gros éléments. Cette composition calibrée le rend bien adapté pour les travaux de construction, notamment pour la fabrication de béton et de mortier.

**- Détermination des proportions relatives des sables 1&2 pour fabriquer le sable mélange :**

En on calcule le pourcentage des deux mélanges pour qu'on obtient un module de finesse  $M_f=2.5$  ; on aura :

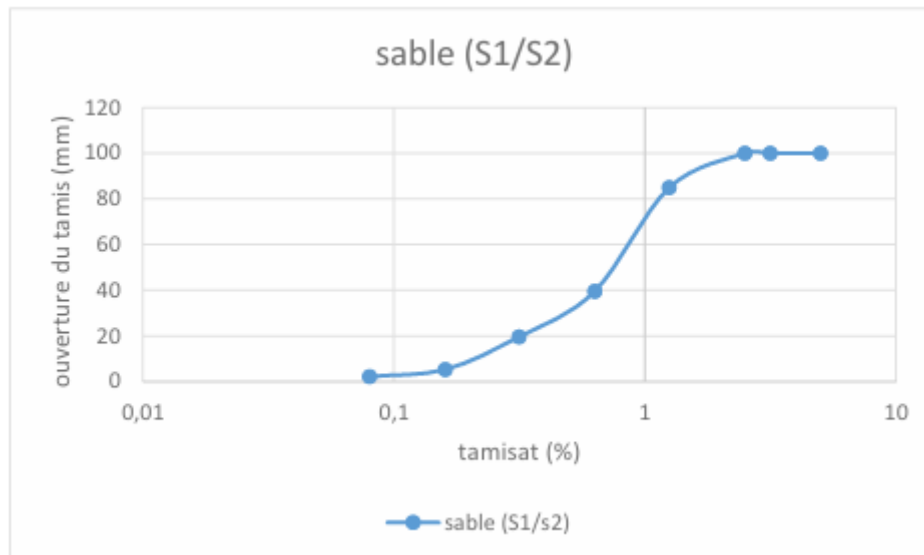
$$G_1 = \frac{M_F - M_{F2}}{M_{F1} - M_{F2}} = \frac{2.5 - 1.06}{2.88 - 1.06} = 79.1\%$$

$$G_2 = \frac{M_{F1} - M_F}{M_{F1} - M_{F2}} = \frac{2.88 - 2.5}{2.88 - 1.06} = 20.9\%$$

Donc, pour obtenir un sable de module de finesse  $M_f = 2.5$ , on doit mélanger 79,1% du sable gros et 20,9% du sable fin. On utilisant ces proportions, on a construit le tableau granulaire suivant du sable mélange :

Analyse granulométrique par tamisage NF P18-560				
Masse de l'échantillon (M1)			1000g	
Ouverture du tamis (mm)	Refus partiels $R_i$ (g)	Refus cumulés $R_n$ (g)	%R.c $RC=100 \cdot R_n / M1$	% du Tamis.c $T_c=100-R_c$
5	0	0	0	100
3,15	0,31	0,31	0,031	99,969
2,5	0,64	0,95	0,095	99,905
1,25	149,5	150,45	15,045	84,955
0,63	455,09	605,54	60,554	39,446
0,315	199,04	804,58	80,458	19,542
0,16	143,1	947,68	94,768	5,232
0,08	30,4	978,08	97,808	2,192
Fond	21,33	999,41	99,941	0,059
Module de finesse du sable : $M_f = 2,509$				

**Tableau II.5 :** Module finesse du 3ème échantillon (79,1 % du Sable gros (0/3) + 20,9% du sable fin (0/2)).



**Figure II.5 :** Courbe granulométrique ( S1/S2)

### Analyse granulométrique du sable S1/S2 mm :

Le graphe montre que le mélange de 79,1 % de sable gros (0/3) et 20,9 % de sable fin (0/2) présente une bonne répartition des tailles de grains, avec une majorité de particules de taille intermédiaire et très peu de gros grains. Cette composition assure une bonne compacité et cohésion, idéale pour la fabrication de béton ou de mortier.

#### - Module de finesse :

Le module de finesse (MF) est une mesure conventionnelle permettant d'évaluer la granularité d'un pouzzolane . Il se calcule en faisant la somme des refus cumulés (exprimés en pourcentage) sur une série de tamis normalisés (0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm), puis en divisant cette somme par 100 :

$$MF = \frac{\sum RC}{10RC} : \text{refus cumule en (\%)}$$

Ce paramètre permet de situer la pouzzolane par rapport à un fuseau de référence :

- MF entre 1,8 et 2,2 : la pouzzolane est majoritairement composée de grains fins (Fuseau B).
- MF entre 2,2 et 2,8 : le pouzzolane est équilibré et convient bien pour le béton (Fuseau A).
- MF entre 2,8 et 3,3 : la pouzzolane est relativement grossière (Fuseau C), ce qui permet d'obtenir des bétons résistants mais moins maniables.

Cette classification aide à choisir le pouzzolane adapté en fonction des exigences du béton à réaliser.

Echantillon	Module de finesse	Classement des sables
Pouzzolane 0/3	2,07	Pouzzolane fin
Sable 0/2	1,06	Sable fin
Sable 0/3	2,88	Sable gros
Sable (0/2+0/3)	2,509	Sable ( fin +gros )

**TableauII.6** : Résultat de classement des sables.

## 4 - Masse volumique absolue :

### 4.1 - But de l'essai :

Le but de l'essai de masse volumique absolue par la méthode du pycnomètre est de mesurer précisément la densité réelle d'un matériau solide, en excluant les vides internes. Cette mesure permet de caractériser la masse par unité de volume de la substance solide elle-même, ce qui est essentiel pour évaluer ses propriétés physiques et assurer le contrôle qualité des matériaux utilisés en construction et industrie.

### 4.2 -Matériel nécessaire :

- Pycnomètre en verre (souvent de 100 cm<sup>3</sup>) avec bouchon à tube capillaire pour assurer un volume précis.
- Balance de précision pour peser le pycnomètre vide, avec l'échantillon, puis rempli d'eau.
- Eau distillée
- Échantillon solide sec, (préalablement séché à l'étuve à 105 °C).
- Entonnoir pour verser l'échantillon dans le pycnomètre.
- Tige en verre pour agiter et éliminer les bulles d'air lors du remplissage.

### 4.3 -Mode opératoire :

- A. Pesée du pycnomètre vide (M0) :** Peser le pycnomètre propre, sec et bouché
- B. Ajout du sable (M1) :** Introduire environ 30 g de sable sec dans le pycnomètre, puis peser l'ensemble.
- C. Remplissage partiel avec de l'eau :** Remplir le pycnomètre à moitié avec de l'eau distillée, puis agiter vigoureusement pour éliminer les bulles d'air emprisonnées entre les grains.
- D. Remplissage complet :** Compléter le remplissage avec de l'eau distillée jusqu'au repère de remplissage sur le pycnomètre, en utilisant une pissette.
- E. Agitation et repos :** Secouer doucement le pycnomètre bouché pour homogénéiser, puis laisser reposer pour stabiliser le volume.

**F. Pesée du pycnomètre rempli sable + eau (M2) :** Sécher les parois extérieures et peser le pycnomètre rempli.

**G. Pesée du pycnomètre rempli d'eau seule (M3) :** Vider, laver, remplir uniquement avec de l'eau distillée jusqu'au même niveau, sécher et peser IV.

- **Calcul de la masse volumique absolue ( $\rho_s$ ) :**

La masse volumique absolue de l'échantillon est calculée par la formule :

$$\rho_s = \frac{M_1}{(M_1 + M_3 - M_2 - M_0)} \times \rho_{s \text{ eau}}$$

D'où :

M0 = masse du pycnomètre vide

M1 = masse du pycnomètre + échantillon

M2 = masse du pycnomètre + échantillon + eau

M3 = masse du pycnomètre + eau.

$\rho_{\text{eau}}$  = masse volumique de l'eau (en général 1 g/cm<sup>3</sup> à 4°C).

• **Pouzzolane :**



-Pycnomètre+eau



-Pycnomètre vide

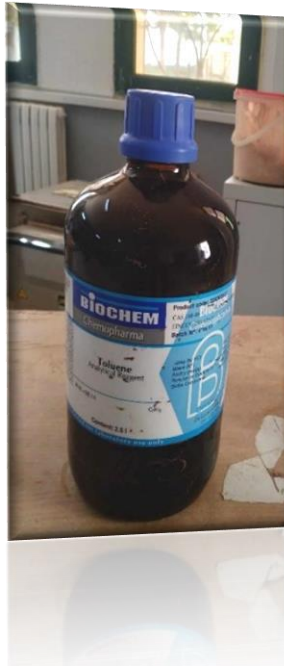


-Pycnomètre+eau+pouzzolane

$$\rho_s(\text{pouzzolane fin}) = \frac{690.3}{(690.3 + 1458.6 - 1600,5 - 440.3)} \times 1$$

$$(\text{pouzzolane fin}) = 6,38 \text{ g/m}^3$$

- La chaux :



-Pycnomètre pour leur mesurer

-Toluene

-Pycnomètre+toluene

En utiliser 60g de la chaux

**Avec :**  $V1 = 0$  (volume de pycnomètre + toluene aux niveaux 0)

$V2 = 19,5 \text{ m}^3$  (volume de passage le toluene + la chaux à maximum)

$M1 = 356\text{g}$  (pycnomètre+toluene)

$M2 = 400,3\text{g}$  (pycnomètre + toluene +chaux)

$$\rho_s(\text{chaux}) = \frac{(M2 - M1)}{(V1 - V2)}$$

$$\rho_s(\text{chaux}) = \frac{(400,3 - 356)}{(0 - 19,5)}$$

$$\rho_s(\text{chaux}) = 2,27 \text{ g/m}^3$$

• Perlite :



- pycnomètre vide



- pycnomètre+eau



-pycnomètre+eau+perlite

$\rho_s$  (Perlite) = 1,86 g /cm<sup>3</sup>

❖ Ciment :

$\rho_s$  (Ciment) = 2,41 g /cm<sup>3</sup>

Les essais	composition	Masse volumique $\rho_s$
1 <sup>er</sup> échantillon	Pouzzolane	6,38
2 <sup>ème</sup> échantillon	perlite	1,86
3 <sup>ème</sup> échantillon	La chaux	2,27
4 <sup>ème</sup> échantillon	ciment	2,41

TableauII.7 : Résultat de masse volumique absolue.

**5 - La masse volumique apparente :**

La masse volumique apparente, définie par la norme NF P 18-554, correspond à la masse d'un matériau rapportée à son volume total, incluant les vides qu'il contient. Autrement dit, elle représente la densité du matériau tel qu'il se présente naturellement, sans compaction ni réarrangement des grains. Cette propriété est essentielle pour caractériser les matériaux granulaires utilisés en construction, notamment en formulation de bétons.

## 5.1 - Mode opératoire :

### - Matériel nécessaire :

- Récipient de volume connu 1L recommander .
- Balance électronique .
- Tamis (pour le pouzzolane , généralement de 4 mm) .
- Entonnoir .
- Reder anoer .
- Etuvent à 105 °C pour le sóchage.

### - Étapes de l'essai :

#### A. Préparation de l'échantillon :

- Tamisez l'échantillon à travers un tamis de 4 mm pour éliminer les particules plus grosses .

#### B. Pesée du récipient vide :

- Pesez le récipient vide et notez sa masse ( $M_1=1400g$ )

#### C. Remplissage du récipient :

- Remplissez le récipient avec l'échantillon à l'aide d'un entonnoir, en laissant tomber l'échantillon d'une hauteur d'environ 15 cm pour éviter le tassement.
- Utiliser une règle a araser pour ecaliser la surface du échantillon au aiveau du bora du récipient

#### D. Pesée du récipient rempli :

- Pesez le récipient rempli de échantillon et notez cette masse ( $M_2$ ).

#### E. Calcul de la masse du échantillon :

- Calculez la masse du échantillon en soustrayant la masse du récipient vide

$$M=M_1-M_2$$

#### F. Calcul de la masse volumique apparente :

- La mase volumique apparente ( $\rho$  sp) est calculée en utilisant la formule V est le volume du récipient (en m<sup>3</sup>) :  $V=1000$  ml.

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

**G. Répétitions de l'essai :**

- Répétez l'essai plusieurs fois (au moins trois) pour obtenir une moyenne fiable.

**❖ Pouzzolane :**

$M_1 = 1400,13\text{g}$



$M_2 = 2645,04\text{g}$



$M = M_2 - M_1 = 2645,04 - 1400,13 = 1244,91\text{g}$

**❖ Perlite :**

Réceptient vide



Réceptiant+perlite(2753,2)

❖ **La chaux :**



Récipient vide (1397,7)



Récipient+ Chaux(1808,04)

❖ **Ciment :  $P = 1,0604 \text{ g/cm}^3$**

**Les résultats :**

Les essais	Composition	La masse volumique Pa
1 <sup>er</sup> essai	Pouzzolane fin	1,244g
2 <sup>ème</sup> essai	Perlite	1,35g
3 <sup>ème</sup> essai	La chaux	0,41g
4 <sup>ème</sup> essai	Ciment	1,0604

**Tableau II.8 :** Les résultats obtenu.

**- Mesure de la masse volumique apparente de ciment selon la norme NFP18-558 :**

Nous avons mesuré la masse volumique apparente de ciment étudiés par la détermination de la masse d'un remplissage d'une mesure d'un litre, qui doit être effectué sans aucun tassement.

Trois essais ont été effectués. La précision de la balance utilisée est de 0.1 gramme, les valeurs moyennes obtenues sont représentées

**- Mesure de la masse volumique absolue de ciment selon la norme NF P 18-558 :**

Cet essai est réalisé à l'aide d'un pycnomètre en utilisant de Toluène. Le mode opératoire de cet essai est comme suit :

- On pèse d'abord le pycnomètre vide et on le remplit par la suite de toluène jusqu'au trait repère, soit une masse (M1),
- On pèse une quantité du ciment, soit une masse (M2),
- On introduit la quantité M2 du ciment dans le Toluène après avoir vidé le pycnomètre à moitié,

- On élimine l'air et on remplit le pycnomètre de toluène au trait repère et on le pèse soit la masse (M3) Donc, la masse volumique absolue est égale à :

$$M_v (\text{abs}) = \frac{M}{(V_1 - V_2)}$$

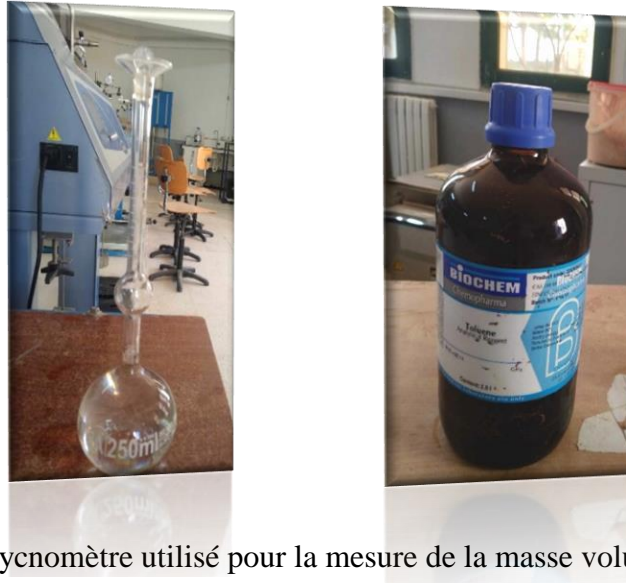


Figure II.6 : Pycnomètre utilisé pour la mesure de la masse volumique absolue.

### - Mesure de la consistance de la pâte du ciment :

L'essai de consistance est effectué à l'aide de l'appareil de Vicat et d'une sonde conformément à la norme NF EN 196-3. Cet essai consiste à déterminer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir la consistance désirée de la pâte du ciment. Le résultat obtenu de la consistance du ciment étudié est présenté ci-dessous dans le tableau.

Temps de prise du ciment selon la norme NF EN 196-3 À l'aide de l'appareil de Vicat et une aiguille, et suivant la norme NF EN 196-3 on a pu déterminer le temps de prise du ciment utilisé et notamment son moment de prise. Les deux étapes essentielles sont les suivantes :

- Le temps de début de prise : c'est le temps mesuré depuis l'instant zéro, au bout duquel la distance entre l'aiguille et la plage soit de 5 mm.
- Le temps de fin de prise : c'est le temps mesuré depuis l'instant zéro au bout duquel l'aiguille ne pénètre pour la première fois que de 6.5 mm dans l'éprouvette.

Les résultats obtenus du temps de prise sont présentés dans le tableau II.8 ci dessous.

Caractérisation du ciment CEM II A-P 42.5 N	
Masse volumique apparente (Kg/m <sup>3</sup> )	1060.4
Masse volumique absolue (Kg/m <sup>3</sup> )	2840
Début de prise (heure)	2h16min43sec
Fin de prise (heure)	1h41min23sec

**Tableau II.9 :** Caractéristique physiques et mécaniques du ciment utilisé.

Les résultats obtenus montrent que les masses volumiques (apparente et absolue) du ciment utilisé, déterminées selon la norme NF P 18-558, sont incluses dans l'intervalle imposé par la norme NA 231 (Norme Algérienne, 1992), compris entre 0.900 – 1.100 g/cm<sup>3</sup> pour la masse volumique apparente et 2.900 – 3.150 g/cm<sup>3</sup> pour la masse volumique absolue.

## 6 - Formulation et composition :

Ce expérimental présente la méthode de fabrication des échantillons de mortier composés de pouzzolane, chaux, ciment, perlite et fibres végétales. Il détaille les étapes de sélection, de mélange et de mise en forme visant à obtenir des matériaux homogènes et représentatifs. L'objectif est d'assurer la fiabilité des résultats en maîtrisant les conditions de séchage et de conservation, afin d'évaluer les propriétés mécaniques et la durabilité des composites. Cette approche permet d'étudier l'influence bénéfique de la pouzzolane sur la résistance et la durabilité, ainsi que le rôle des fibres végétales dans l'amélioration l'isolation thermique et phonique ainsi que de la cohésion et la réduction des fissurations.

## 7 - Choix des constituants des matériaux élémentaires :

Le choix des constituants des échantillons repose sur leurs propriétés complémentaires pour optimiser la performance et la durabilité des composites. La pouzzolane, riche en silice et alumine, réagit avec la chaux pour former des composés cimentaires qui améliorent la résistance et réduisent la porosité tout en diminuant l'impact environnemental grâce à la réduction du clinker. La chaux, liant principal, assure la cohésion initiale et est compatible avec les fibres végétales. Le ciment Portland est utilisé en complément pour une prise rapide, son dosage étant limité pour protéger les fibres. La perlite, granulat léger, allège la matrice et améliore l'isolation thermique. Enfin, les fibres végétales renforcent la cohésion et limitent les fissurations, leur durabilité étant améliorée par la présence de pouzzolane qui réduit l'alcalinité de la matrice.

Ce choix est guidé par des critères techniques, économiques et environnementaux afin de concevoir un matériau durable, performant et écologique.

Les étapes de fabrication des échantillons étudiés dans chaque formulation sont les suivantes :

- **Quantités pour une moule dans chaque éprouvette de 4×4×16 cm (256 cm<sup>3</sup>)**

Les constituants						
	Pouzzolane	Perlite	Ciment	La chaux	Eau de mer	Fibre végétale
Formulation à base de chaux vive et fibres végétales	422,4g	15,36g		326,4g	330L	61,44g
Formulation à base de ciment et fibres végétales:	345,6g	30,72g	537,6g		260L	61,44g
Formulation à base de chaux vive et perlite :	480,8g	61,44g		435,2g	293,36L	
Formulation à base de ciment et perlite :	576g	76,8g	896g		309,76L	

**TableauII.10 :** Les quantités des constituants pour 3éprouvettes de mortier.

Composant	Calcul
Ciment	450g
Sable	1350g
Eau	225g

**TableauII.11 :** Quantités des constituants pour 3 éprouvettes de témoin(béton).

### 7.1 - Préparation des échantillons :

- **Malaxage :**

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction de ciment		Introduction de sable		Raclage de la cuve		
Durée des opérations			30s	30s	30s	15s	1min15s	60s
Etat du malaxeur	Arrête		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrête		Vitesse rapide

**TableauII.12 :** Opération pour déterminer le mortier normal (témoin).

Les étapes de fabrication des échantillons étudiés dans chaque formulation sont les suivantes :

**A. Première étape :**

Après avoir obtenu des échantillons, nous les mélangeons les uns avec les autres pour obtenir un mélange homogène avec des dimensions différentes. Ensuite nous avons fabriqué quatre types de formulation et témoin en quantités différentes divisées comme suit dans le tableau 1 et 2.

**B. Deuxième étape :**

- Préparation du malaxeur
- Humidifier légèrement la cuve du malaxeur avant usage pour éviter que l'eau de gâchage soit absorbée par les parois.
- Verser d'abord l'eau dans la cuve, puis ajouter progressivement les matériaux (ciment, sable, additifs) pendant que le malaxeur tourne à vitesse lente.
- Malaxer à vitesse lente pendant 1 minute (30 s après l'ajout de l'eau, puis 30 s pendant l'ajout progressif des matériaux).
- Passer à la vitesse rapide et malaxer encore 30 secondes.
- Arrêter le malaxeur 30 secondes, racler soigneusement les parois et le fond pour éviter les amas.
- Reprendre le malaxage à grande vitesse pendant 60 secondes.
- Graisser les moules normalisés ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ).
- Remplir le moule à moitié, puis le placer sur une table à choc vibrante (60 coups/min) pour compacter le mortier.
- Retirer le moule, le remplir complètement, égaliser la surface et le remettre sur la table à choc pour homogénéiser.



Malaxeur électrique



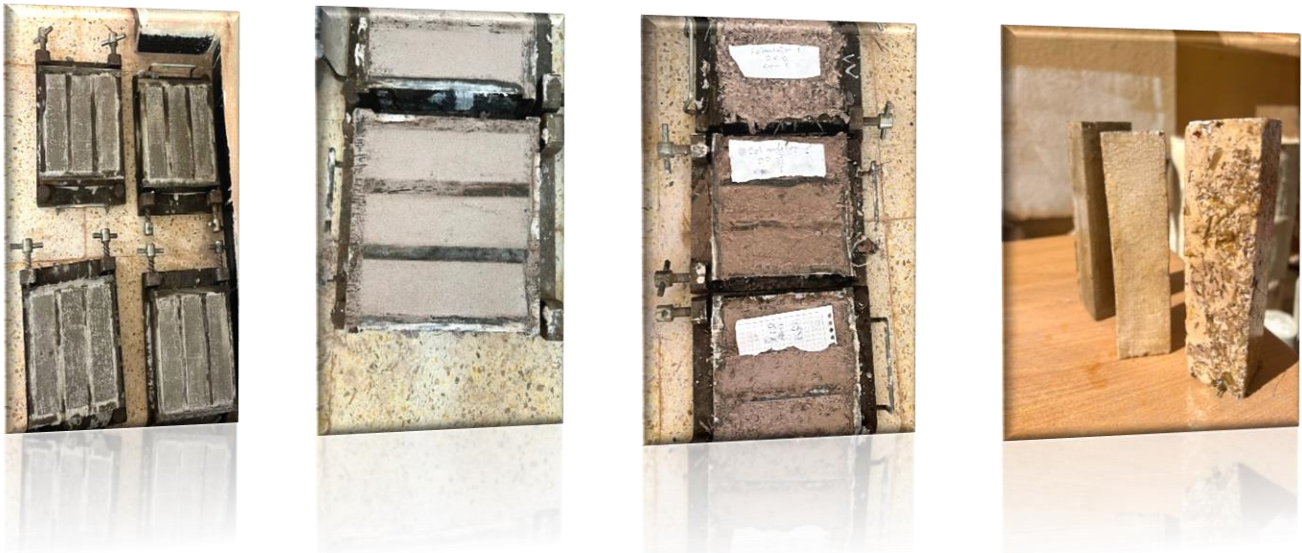
La table à choc



FigureII.7 : Etape de pétrissage de l'échantillon.

**C. Troisième étape :**

Après avoir placé l'échantillon dans le moule et retiré celui-ci du dispositif de pression, le moule est posé sur une surface plane. La pression exercée permet d'assurer une compaction optimale et une homogénéisation de la matière pendant la phase de durcissement ou de séchage. Le maintien du moule sous cette pression pendant une période prolongée (généralement 24 heures) garantit que l'échantillon se solidifie sans défauts tels que bulles d'air ou déformations, assurant ainsi la stabilité et la qualité finale du bloc moulé, Cette opération a été réalisée dans le laboratoire de Génie Civil , le Figure 4 présente les étapes du protocole pour le moulage et la fabrication des échantillons.



**FigureII.8 :** Forme finale des échantillons (produit).

**8 - Caractérisation Des Différentes Compositions :****8.1 - L'état Frais :****A. La Teneur En Air occlus :**

**FigureII.9 :** Appareil l'aéromètre à mortier ( mesure de la teneur en air).

**But de l'essai :**

L'essai de la teneur en air occlus dans un mortier frais a pour objectif principal de déterminer la quantité d'air emprisonné sous forme de bulles dans le témoin(béton) au moment de sa confection.

**B. Mesure la consistance des mortiers :**

FigureII.10 : Appareille de maniabilimètre.

**• Objectif :**

La mesure de la consistance des mortiers vise à évaluer leur fluidité et leur maniabilité lorsqu'ils sont frais. Cette évaluation permet de contrôler la facilité de mise en œuvre du mortier, d'optimiser sa formulation, notamment en ajustant la quantité d'eau ou d'adjuvants, et d'assurer une bonne qualité d'application.

**• Principe de l'essai :**

Dans ces essais, la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration.

**• Equipement nécessaire :**

L'appareil utilisé est appelé maniabilimètre B" et est schématisé sur la figure cidessous. Il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique ( 60 cm x 30 cm x 30cm ), posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible. Un malaxeur normalisé est également requis pour la réalisation du mortier.

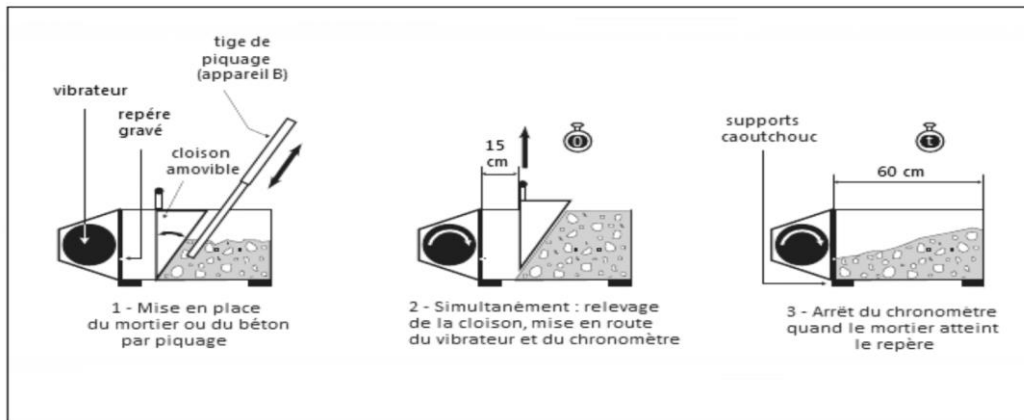


Figure II.11 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre B.

## 8.2 - L'état Durci :

### A. La Résistance à la compression :

Déterminer la résistance à la compression d'un échantillon durci (forme d'éprouvette) en appliquant une charge croissante jusqu'à rupture.

#### - Echantillon (mortier et témoin) :

**Positionnement** : Placer l'échantillon au centre du plateau inférieur de la presse, bien aligné.

**Chargement** : Appliquer une charge compressive croissante à vitesse constante (force appliqué à la main).

**Observation** : Surveiller la charge jusqu'à ce que l'échantillon se fissure puis se rompe.

**Enregistrement** : Noter la charge maximale  $F_c$  au moment de la rupture.

La résistance à la compression  $R_c$  en ( $N/mm^2$ ) est calculée au moyen de la formule :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

Où :

$R_c$  : la résistance à la compression

$F_c$  : charge de rupture en (N).

$b^2$  : épaisseur de l'éprouvette est égale à 40



Figure II.12: L'essai de compression.

### B. La résistance à la flexion trois points :

Dans cette section, nous présentons les résultats des essais de flexion à trois points réalisés au laboratoire de Génie Civil avec une machine universelle Control à vitesse manuelle lente. Plusieurs types d'échantillons, dont et un échantillon standard industriel, ont été testés pour comparer et valider les témoins obtenus.

#### - Mode essais de flexion :

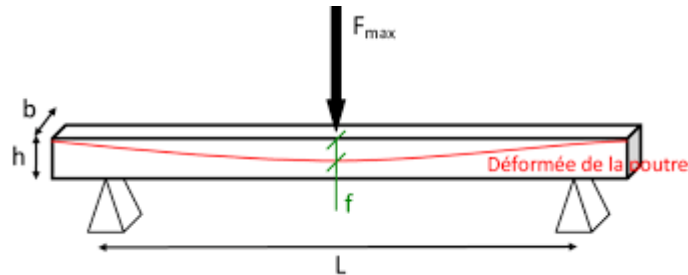


Figure II.13 : Présente le dispositif de flexion.

B : largeur.

L : longueur.

H : épaisseur d'échantillons.

Les propriétés mécaniques étudiées dans cette partie sont les propriétés de flexion trois points. Le principe de la flexion 3 points consiste à poser l'éprouvette sur deux appuis et lui appliquer une force à vitesse constante perpendiculairement à sa sue.



Figure II.14 : L'Essai de flexion de trois point.

#### - Les étapes du principe de la flexion 3 points :

1. Découpage les échantillons selon la norme.
2. Déterminez l'axe en utilisant la méthode des trois points.
3. Poser les échantillons un par un sur deux appuis.

4. Appliquer une force à vitesse constante perpendiculairement sur l'axe spécifiée à sa surface jusqu'à la rupture.
5. Prendre les valeurs obtenues à la rupture d'échantillon sur la machine en raison de la résistance maximale de chaque échantillon. Pour le calcul de la résistance de flexion  $\sigma$  sont déterminées selon la formule (I).

$$R_f = \frac{1,5FL}{b^3} \quad (I)$$

### 8.3 - La Résistance thermique de compression :

#### A. Essai d'Ultrasons :

##### ❖ Objectif de l'essai :

L'essai ultrasonique est une technique efficace pour évaluer la qualité d'échantillon procédés sur place, sans endommager la structure, facilitant ainsi le diagnostic et la gestion du patrimoine bétonné.

##### ❖ Principe de l'essai :

Cet essai non destructif permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) la quelle est d'autant plus élevée que le béton est plus dense donc plus résistant. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance connue. L'appareil comprend avec capteurs mis en contact avec le béton, un générateur d'ondes, un amplificateur, un circuit de mesure du temps et un affichage digitale du temps mis par les ondes longitudinales pour traverser le béton entre les transducteurs, la vitesse d'onde,  $V$ , dans un milieu homogène, isotrope et élastique.

##### ❖ Equipement nécessaire :

L'appareil comprend les accessoires suivants :

- Un générateur d'impulsions électriques,
- Paire de transducteurs
- Un amplificateur un dispositif électronique de mesure de temps permettant de mesurer la durée écoulée entre le départ d'une impulsion générée par le transducteur - émetteur et son arrivée au transducteur-récepteur, un barreau de calibrage est fourni pour permettre d'obtenir une ligne de référence du mesurage de la vitesse.



**Figure II.15 :** Appareil d'auscultation sonore (Essai d'ultrason ).

**- Description de l'appareil (ultrason) :**

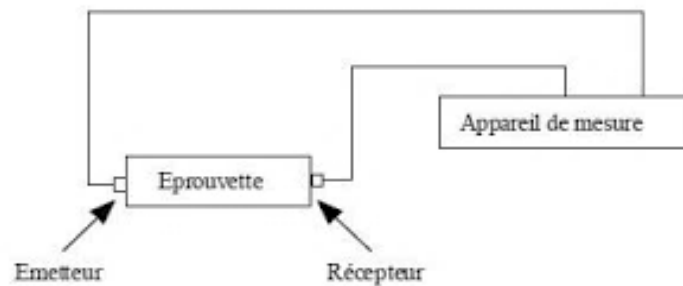
L'appareil d'auscultation dynamique émet des impulsions ultrasoniques en contact avec le béton, puis mesure et affiche le temps de propagation des ondes à travers le matériau.

Une tête de transmission et une tête de réception

Deux câbles de connexion

Deux piles alcalines 1,5 V type « D »

Un afficheur digital.



**Figure II.16 :** Schéma simplifié de la mesure de la vitesse de son.

**• Mode opératoire :**

Pour la mise en route de l'appareil il faut :

1. Vérifier que les piles sont correctement installées.
2. Connecter les deux transducteurs avec les câbles, sans distinction d'émetteur ou récepteur.
3. Allumer l'appareil avec l'interrupteur.
4. Choisir une surface lisse et sans fissures à tester.
5. Appliquer une fine couche de produit couplant sur chaque transducteur.

6. Placer et appuyer les transducteurs sur la surface.
7. Déplacer légèrement les sondes tout en maintenant la pression pour obtenir la valeur stable la plus faible.
8. Noter les valeurs affichées et répéter l'essai à différents endroits.

**B. Essai de mesure la conductivité thermique :**

L'appareil de la mesure de la conductivité thermique (CT mètres Le CT-METRE est un dispositif conçu pour mesurer avec précision les propriétés thermiques de matériaux homogènes et isotropes. Il se compose de deux parties :

L'organe de commande, qui génère la puissance de chauffage et interprète la courbe d'élévation de température du matériau ; et la sonde, qui transmet la puissance de chauffage et mesure la température induite dans le matériau à tester.

- **Objectif de l'essai :**

Déterminer expérimentalement la conductivité thermique de l'échantillons de forme prismatique (4×4×16) a chaque changement des jour (7jour , 28jour , 60jour , 90jour)

- **Mode d'emplois :**

- Après séchage des échantillons.
- Laissez l'échantillon repose pendant un certain temps.
- Percez l'échantillon avec un diamètre de 2 mm et une profondeur de 1 cm.
- Versez la colle dans les deux trous.
- Allumez l'appareil.
- Placez les connecteurs à l'intérieur des deux trous.
- Allumez l'appareil et lire les données.
- Répéter le processus avec tous les autres échantillons selon les jours spécifiés (7j,28j,60j,90j).



Figure II.17 : Les étapes du principe de la conductivité thermique (CT mètre).

Pour le calcul de la résistance thermique ( $R_{th}$ ) sont déterminées selon la suivent :

K: conductivité thermique  $(\frac{W}{m \times K})$

T : Température thermique ( $C^\circ$ )

C : capacité thermique massique  $(\frac{M^3}{m^3 \times K})$

D : diffusivité thermique  $(\frac{m^2}{S})$

Rho : la résistance thermique  $(\frac{m^2 \times K}{W})$

Avec :  $1mm^2 = 10^{-6} \frac{m^2}{S}$

Avec :  $100(\frac{C^\circ \times cm}{W}) = 0,01(\frac{m^2 \times K}{W})$

## 9- L'absorption d'eau :

### 9.1- Essai d'absorption par capillarité :

Le but de l'essai d'absorption par capillarité est de mesurer la quantité d'eau absorbée par un matériau poreux en contact avec de l'eau, afin d'évaluer sa porosité et sa sensibilité à l'humidité. Cet essai permet d'estimer la durabilité du matériau face aux dégradations liées à l'eau, comme le gel-dégel ou les attaques chimiques, et d'optimiser la formulation des matériaux pour améliorer leur résistance.



**Figure II.18** : Essai d'absorption d'eau par capillarité des échantillons.

Le coefficient d'absorption capillaire est calculé par la relation suivante :

$$C_a = \frac{M_x - M_0}{A} \text{ , en Kg/m}^2$$

Où :

$M_x$  : Masse de l'éprouvette à une échéance donnée (Kg).

$M_0$  : Masse initiale de l'éprouvette (Kg) .

$A$  : La section de l'éprouvette ( $m^2$ ).

## **10 - CONCLUSION :**

Le chapitre 2 présente les matériaux utilisés pour fabriquer les échantillons d'isolation, ainsi que la méthode suivie pour tester leurs performances. On y décrit les différentes étapes de préparation (mélange, mise en forme, séchage) et les essais réalisés pour mesurer leurs propriétés physiques, mécaniques, thermiques et acoustiques. Cette démarche permet de comparer objectivement les matériaux et de repérer ceux qui offrent la meilleure isolation pour le bâtiment.

# **CHAPITRE 3 :**

## **Résultats et expérimentale**

## Résultats et interprétations

### 1- Introduction :

Dans cette section, nous exposerons les résultats obtenus concernant les performances thermiques ainsi que les propriétés mécaniques des matériaux étudiés, en mettant un accent particulier sur la résistance à la flexion et à la compression. Ces résultats proviennent d'essais rigoureux menés au laboratoire de génie civil de notre université, où chaque échantillon a été soumis à une série de tests normalisés. L'approche expérimentale adoptée repose sur la comparaison systématique avec un échantillon témoin, ce qui permet d'évaluer précisément l'impact des différentes modifications apportées aux matériaux. Cette double analyse, thermique et mécanique, offre une compréhension approfondie des effets des traitements appliqués, et constitue une étape essentielle pour valider les hypothèses formulées dans le cadre de cette étude.

Cette introduction souligne la rigueur de la méthode expérimentale, la nature des tests réalisés, et la pertinence de la comparaison avec un témoin pour interpréter les résultats, conformément aux principes de la démarche expérimentale en sciences des matériaux et génie.

### 2 - Caractérisation physiques et thermique :

#### 2.1 – Physique :

##### 2.1.1 – Mesure de la consistance des mortiers :

###### A. La Teneur En Air occlus :

L'expérience est réalisée immédiatement après le mélange des échantillons, qui sont ensuite moulés. Ce procédé est appliqué aux trois échantillons, et les données sont également collectées par d'autres méthodes pour compléter l'analyse.

Le témoin : 17% Volume d'air occlus mesuré.

###### B. Essai de maniabilimètre :

La composition du mortier à tester le suivant :

Sable normalisé : 1350g

Ciment : 450g

Eau : 225g      Avec : Le rapport E/C=0,5 (à partir essai de Vicat)

Maniabilimètre	E/C	Temps d'écoulement (s)
Témoin	0,5	7

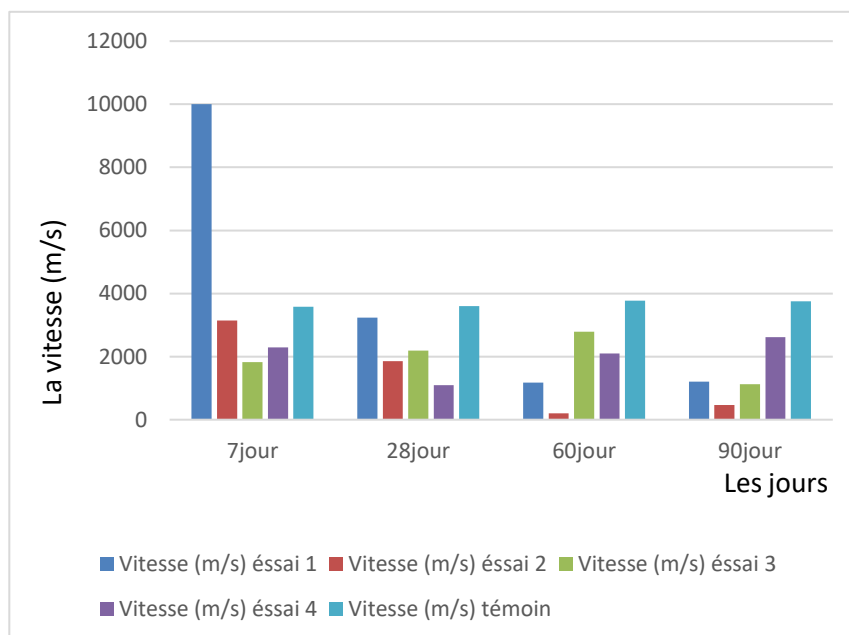
### 3 - La Résistance et homogénéité de matériaux :

#### 3.1- Essai de ultrasons :

Quelques jours après le coulage, les échantillons ont été testés par ultrasons. La vitesse des ondes a été mesurée sur éprouvettes par formulation, puis les résultats ont été moyennés pour plus de précision. Les données sont présentées dans les tableaux et graphiques suivants :

Essai de ultrason					
Vitesse (m/s)	Les essais	7jour	28jour	60jour	90jour
	Essai 1	10000	3239	1177	1201
	Essai 2	3143	1852	198	465
	Essai 3	1820	2195	2787	1120
	Essai 4	2289	1096	2094	2619
	Témoin	3579	3602	3774	3753

**Tableau III.1 :** Vitesse longitudinale de propagation des ultrasons dans l'échantillon .



**Figure III.1:** Évolution de la vitesse mesurée par ultrasons selon la durée d'essai.

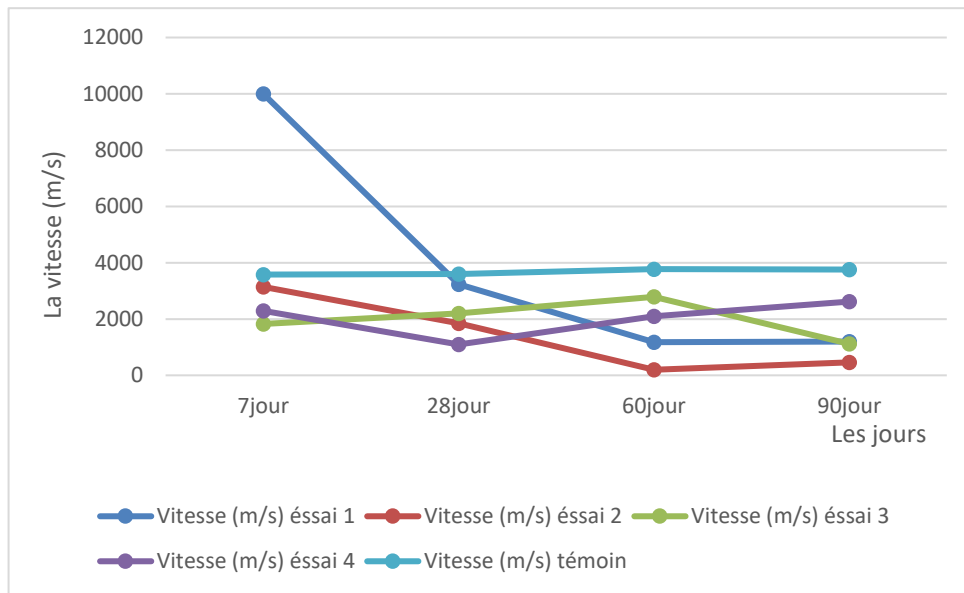


Figure III.2 : Évolution de la vitesse en fonction du temps d’essai par ultrason.

Au début de l'expérience, le témoin montre une grande rapidité, mais cette performance diminue vite avec le temps, le mettant en position d'infériorité par rapport aux autres essais dès 28 jours. L'essai numéro 3 se distingue clairement parmi tous : il conserve une vitesse plus élevée et plus constante que les autres tout au long de la période d'observation, ce qui en fait le plus performant sur la durée. En revanche, l'essai 2 affiche la vitesse la plus basse à 90 jours, signalant ainsi une performance inférieure à ce terme.

Qualité	Vitesse de propagation (m /s)
<b>Excellente</b>	Supérieur à 4200
<b>Bonne</b>	3700-4200
<b>Douteuse</b>	3200-3700
<b>Mauvaise</b>	2500-3200
<b>Très mauvaise</b>	Inférieure à 2500

Dans cette expérience, nous observons que les différentes quantités de matériaux influencent positivement la qualité des échantillons, ce qui les rend acceptables pour la construction. Nous remarquons également que la durée de maturation affecte considérablement la qualité du mortier.

## 3.2 - Résistance à la compression :

7jour			
Les essais	Force(N)	La résistance de compression en Mpa(N/mm <sup>2</sup> )	résistance moyene
essai 1	1500	0,9375	1
	1700	1,0625	
essai 2	12100	7,5625	7,375
	11500	7,1875	
essai 3	1300	0,8125	0,8125
	1300	0,8125	
essai 4	25300	15,8125	17,0625
	32400	20,25	
témoin	22200	13,875	18,5625
	37200	23,25	

Tableau III.2 : Résistances moyennes à la compression des mortiers étudiés à 7jour.

28jour			
Les essais	Force(N)	La résistance de compression en Mpa(N/mm <sup>2</sup> )	résistance moyene
essai 1	3200	2	1,78125
	2500	1,5625	
essai 2	9200	5,75	5,375
	8000	5	
essai 3	2700	1,6875	1,5
	2100	1,3125	
essai 4	23600	14,75	15,3125
	25400	15,875	
témoin	39300	24,5625	25,65625
	42800	26,75	

Tableau III.3 : Résistances moyennes à la compression des mortiers étudiés à 28 jour.

60jour			
Les essais	Force(N)	La résistance de compression en Mpa(N/mm <sup>2</sup> )	résistance moyene
essai 1	3500	2,1875	2,25
	3700	2,3125	
essai 2	18600	11,625	10,375
	14600	9,125	
essai 3	2700	1,6875	1,5625
	2300	1,4375	
essai 4	24500	15,3125	16,8125
	29300	18,3125	
témoin	47500	29,6875	32,03125
	55000	34,375	

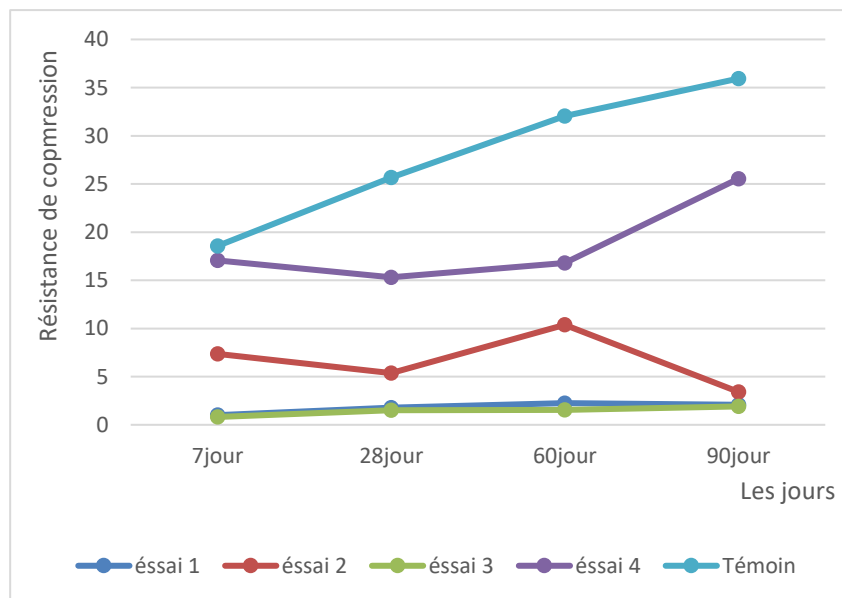
Tableau III.4 : Résistances moyennes à la compression des mortiers étudiés à 60 jour.

90jour			
Les essais	Force(N)	La résistance de compression en Mpa(N/mm <sup>2</sup> )	résistance moyene
essai 1	3100	1,9375	2,0625
	3500	2,1875	
essai 2	5700	3,5625	3,421875
	5250	3,28125	
essai 3	2900	1,8125	1,90625
	3200	2	
essai 4	40500	25,3125	25,546875
	41250	25,78125	
témoin	51600	32,25	35,9375
	63400	39,625	

**Tableau III.5 :** Résistances moyennes à la compression des mortiers étudiés à 90 jour.

La résistance de la compression moyenne Mpa)				
Les essais	7jour	28jour	60jour	90jour
<b>Essai 1</b>	1	1,78125	2,25	2,0625
<b>Essai 2</b>	7,375	5,375	10,375	3,421875
<b>Essai 3</b>	0,8125	1,5	1,5625	1,90625
<b>Essai 4</b>	17,0625	15,3125	16,8125	25,546875
<b>Témoin</b>	18,5625	25,65625	32,03125	35,9375

**Tableau III.6 :** Résistances moyennes à la compression des mortiers étudiés par les jours.



**Figure III.3 :** Évolution de la résistance à la compression des différents essais au cours du jour.

Le graphique montre que l'échantillon témoin a la meilleure résistance à la compression tout au long de l'essai, avec une progression régulière de 18 à 36 MPa entre 7 et 90 jours. L'essai 4 se distingue aussi, démarrant à 16 MPa, connaissant une légère baisse, puis une forte augmentation pour atteindre 25 MPa à 90 jours, ce qui indique un bon potentiel à long terme. En revanche, l'essai 2 est instable : il monte à 10 MPa à 60 jours puis chute à 4 MPa, montrant un manque de fiabilité. Enfin, les essais 1 et 3 restent très faibles et stables (autour de 2 MPa), ce qui les rend inadaptés pour des usages nécessitant une bonne résistance.

En résumé, le témoin est la référence, suivi de l'essai 4, tandis que les autres essais sont insuffisants

### 3.3 - Résistance à la Flexion :

#### 3.3.1 - Essai de flexion en trois point :

7jour			
Les essais	Force(N)	La résistance de Flexio en Mpa(N/mm <sup>2</sup> )	résistance moyene
essai 1	200	0,75	0,75
	200	0,75	
essai 2	1000	3,75	4,3125
	1300	4,875	
essai 3	200	0,75	0,75
	200	0,75	
essai 4	1700	6,375	7,3125
	2200	8,25	
témoin	2200	8,25	8,25
	2200	8,25	

**Tableau III.7 :** Résistances moyennes à la flexion des mortiers étudiés à 7jour.

28jour			
Les essais	Force(N)	La résistance de Flexion en Mpa(N/mm <sup>2</sup> )	résistance moyene
essai 1	100	0,375	0,375
	100	0,375	
essai 2	1000	3,75	3,201
	700	2,625	
essai 3	100	0,375	0,375
	100	0,375	
essai 4	2100	7,875	8,8125
	2600	9,75	
témoin	2800	10,75	9,6875
	2300	8,625	

**Tableau III.8 :** Résistances moyennes à la flexion des mortiers étudiés à 28 jour.

60jour			
Les essais	Force(N)	La résistance de Flexion en Mpa(N/mm <sup>2</sup> )	résistance moyene
essai 1	400	1,5	1,125
	200	0,75	
essai 2	900	3,375	3,9375
	1200	4,5	
essai 3	400	1,5	1,125
	200	0,75	
essai 4	3000	11,25	9,1875
	1900	7,125	
témoin	3300	12,375	11,625
	2900	10,875	

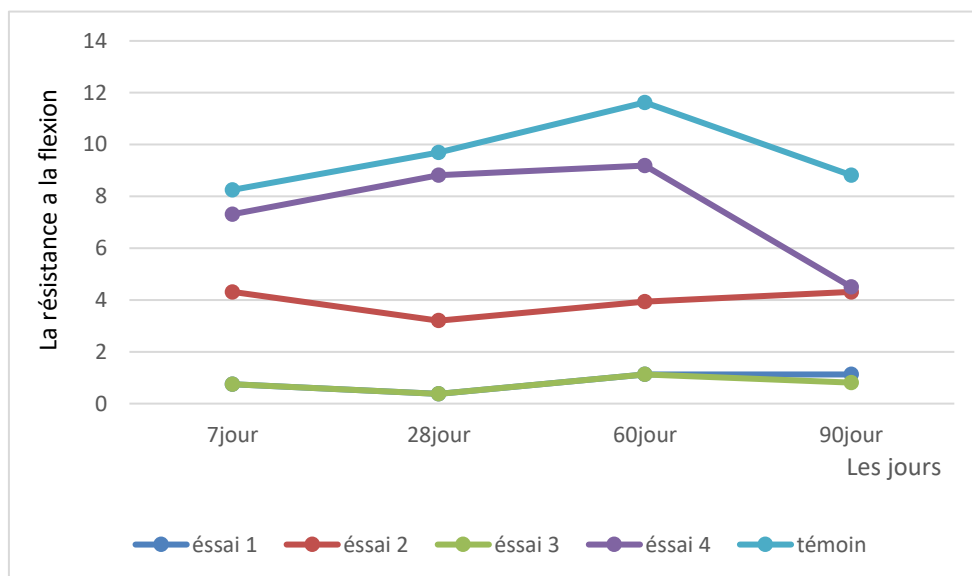
**Tableau III.9 :** Résistances moyennes à la flexion des mortiers étudiés à 60 jour.

90jour			
Les essais	Force(N)	La résistance de Flexion en Mpa(N/mm <sup>2</sup> )	résistance moyenne
essai 1	300	1,125	1,125
	300	1,125	
essai 2	1100	4,125	4,3125
	1200	4,5	
essai 3	200	0,75	0,80625
	230	0,8625	
essai 4	1200	4,5	4,5
	1200	4,5	
témoin	2400	9	8,8125
	2300	8,625	

**Tableau III.10 :** Résistances moyennes à la flexion des mortiers étudiés à 90 jour.

La résistance de Flexion final (Mpa)				
Les essais	7jour	28jour	60jour	90jour
<b>Essai 1</b>	0,75	0,375	1,125	1,125
<b>Essai 2</b>	4,3125	3,201	3,9375	4,3125
<b>Essai 3</b>	0,75	0,375	1,125	0,80625
<b>Essai 4</b>	7,3125	8,8125	9,1875	4,5
<b>Témoin</b>	8,25	9,6875	11,625	8,8125

**Tableau III.11 :** Résistances moyennes à la flexion des mortiers étudiés par les jours.



**Figure III.4 :** Évolution des résultats des essais et du témoin au cours du temps.

Le graphique montre que l'échantillon témoin a la meilleure résistance à la flexion tout au long du temps, avec une progression de 8 à 12 entre 7 et 60 jours, puis une légère baisse à 9 à 90 jours. L'essai 4 suit une évolution similaire mais reste toujours en dessous du témoin, atteignant un maximum de 9 à 60 jours avant de chuter fortement à 4 à 90 jours. L'essai 2 est stable mais faible, autour de 3 à 4 sur toute la période. Enfin, les essais 1 et 3 présentent

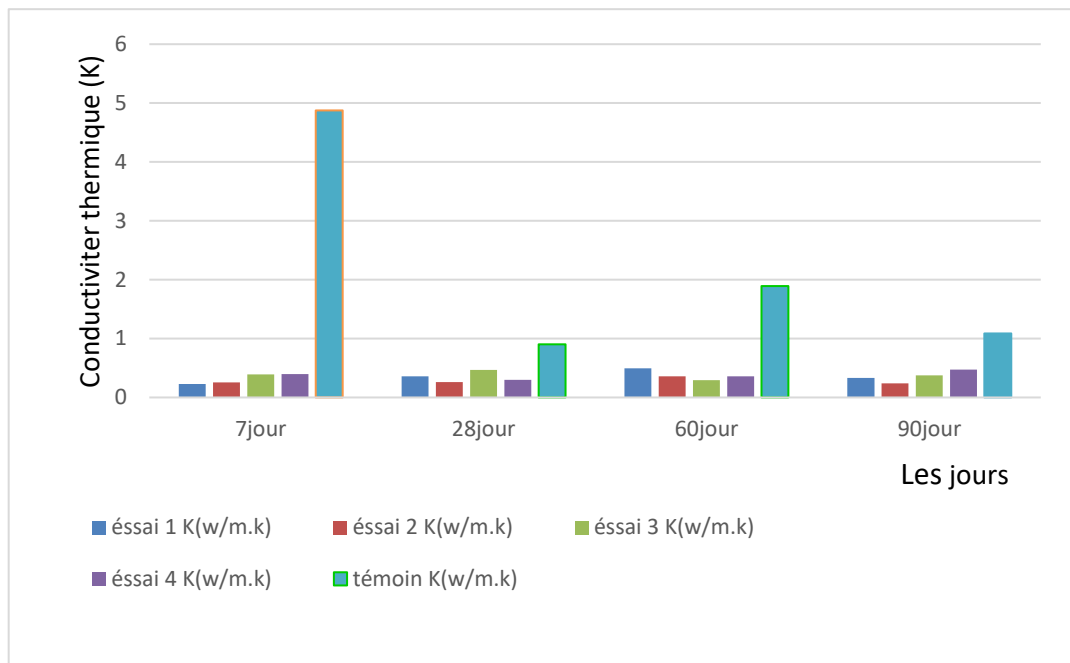
des résistances très faibles et quasi constantes, ne dépassant jamais 2.

En résumé, le témoin est le plus performant, suivi par l'essai 4 jusqu'à 60 jours, tandis que les autres essais restent nettement inférieurs.

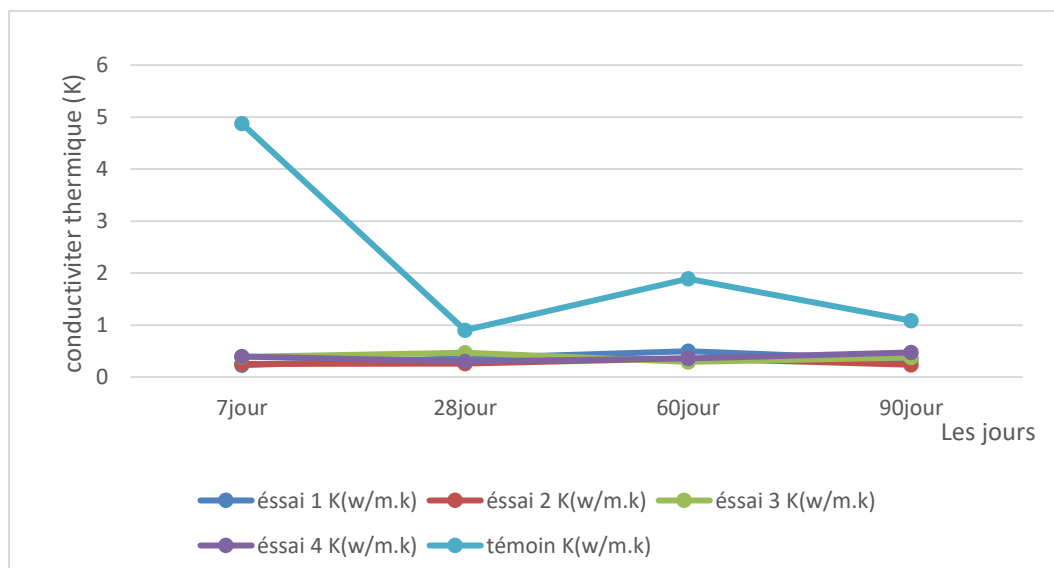
**3.4 - Essai de mesure la conductivité thermique :**

Echantillon	Matériaux composés
Echantillon 1	Formulation à base de chaux vive et fibres végétales
Echantillon 2	Formulation à base de ciment et fibres végétales
Echantillon 3	Formulation à base de chaux vive et perlite
Echantillon 4	Formulation à base de ciment et perlite

**Tableau III.12 : Classification du Mortier.**



**Figure III.5 : Variation de la conductivité thermique des échantillons au fil du temps.**



**Figure III.6 :** Évolution de la conductivité thermique (K) en fonction du temps pour différents essais. La conductivité thermique du témoin est constamment beaucoup plus élevée que celle des essais, ce qui traduit une isolation nettement moins efficace.

Parmi les essais, le test 2 se démarque par sa conductivité thermique la plus faible, offrant ainsi la meilleure isolation, tandis que le test 4 présente la conductivité thermique la plus élevée parmi les essais, indiquant une performance légèrement moindre.

**3.5 - L'absorption d'eau :**

**3.5.1 - Essai d'absorption par capillarité :**

Masse l'éprouvette initiale (7j)	
essai 1	276,37
essai 2	351,81
essai 3	319,71
essai 4	475,81
témoin	568,68

d'absorption par capillarité (g)					
7jour					
Temps	5min	15min	30min	1h	2h
essai 1	293,64	314,09	326,06	342,97	349,87
essai 2	356,11	359,34	361,08	363,73	364,31
essai 3	325,27	336,19	343,42	353,66	357,93
essai 4	477,13	478,86	480,06	481,86	482,46
Témoin	569,21	569,54	569,78	571,12	571,86

Masse l'éprouvette initiale (28j)	
essai 1	272,52
essai 2	311,43
essai 3	334,86
essai 4	487,69
témoin	546,47

Essai d'absorption par capillarité (g)					
28jour					
Temps	5min	15min	30min	1h	2h
essai 1	281,39	289,68	290,34	302,74	309,89
essai 2	316,41	318,65	319,78	322,44	323,56
essai 3	339,8	347,19	348,98	358,64	361,2
essai 4	489,33	490,8	491,45	493,99	494,32
témoin	546,74	546,98	547,53	548,11	549,21

Masse l'éprouvette initiale (60j)	
essai 1	307,12
essai 2	310,7
essai 3	346,3
essai 4	409,9
Témoin	547,86

Essai d'absorption par capillarité(g)					
60jour					
Temps	5min	15min	30min	1h	2h
essai 1	307,25	307,8	308,12	310,03	311,6
essai 2	316,71	318,18	319,76	321,64	322,75
essai 3	347,4	353,18	359,12	367,57	379,14
essai 4	410,11	411,59	412,82	414,63	416,2
témoin	548,43	548,66	549,05	550,56	552,12

Masse l'éprouvette initiale (90j)	
essai 1	290,52
essai 2	280,13
essai 3	318,98
essai 4	479,79
Témoin	551,3

Essai d'absorption par capillarité(g)					
90jour					
Temps	5min	15min	30min	1h	2h
essai 1	296,78	298,81	300,85	304,1	305,35
essai 2	294,12	303,42	311,57	322,15	323,64
essai 3	324,98	332,16	339,46	349,54	357,79
essai 4	481,07	482,59	484,23	486,56	488,78
témoin	553,49	554,89	556,21	560,2	561,57

**- Calculer le coefficient d'absorption capillaire Ca en (Kg/m<sup>2</sup>) :**

L'absorption d'eau (coefficient Ca en Kg/m <sup>2</sup> )					
7jour					
Le temps	5 min	15 min	30 min	1h	2h
essai 1	10,79	23,57	31,06	41,61	45,93
essai 2	2,68	4,7	5,8	7,45	7,81
essai 3	3,47	10,3	14,82	21,23	23,88
essai 4	0,825	1,9	3,15	3,78	4,15
Témoin	0,33	0,53	0,68	1,52	1,98

L'absorption d'eau (coefficient Ca en Kg/m <sup>2</sup> )					
28jour					
Le temps	5 min	15 min	30 min	1h	2h
essai 1	5,43	10,75	11,13	18,88	23,35
essai 2	3,11	4,51	5,21	6,88	7,81
essai 3	3,08	7,7	8,83	14,68	16,46
essai 4	1,025	1,94	2,35	3,97	4,14
Témoin	0,16	0,32	0,56	1,025	1,71

L'absorption d'eau (coefficient Ca en Kg/m <sup>2</sup> )					
60jour					
Le temps	5 min	15 min	30 min	1h	2h
essai 1	0,08	0,425	0,625	1,81	2,8
essai 2	3,75	4,67	5,66	6,83	7,53
essai 3	0,68	4,3	8,01	13,29	20,52
essai 4	0,13	1,05	1,82	2,95	3,93
Témoin	0,35	0,5	0,74	1,68	2,66

L'absorption d'eau (coefficient Ca en Kg/m <sup>2</sup> )					
90jour					
Le temps	5 min	15 min	30 min	1h	2h
essai 1	3,91	5,18	6,45	8,48	9,26
essai 2	8,74	14,55	19,65	26,26	27,17
essai 3	3,75	8,23	12,8	19,1	24,25
essai 4	0,8	1,75	2,77	4,23	5,62
Témoin	1,36	2,24	3,08	5,56	6,42

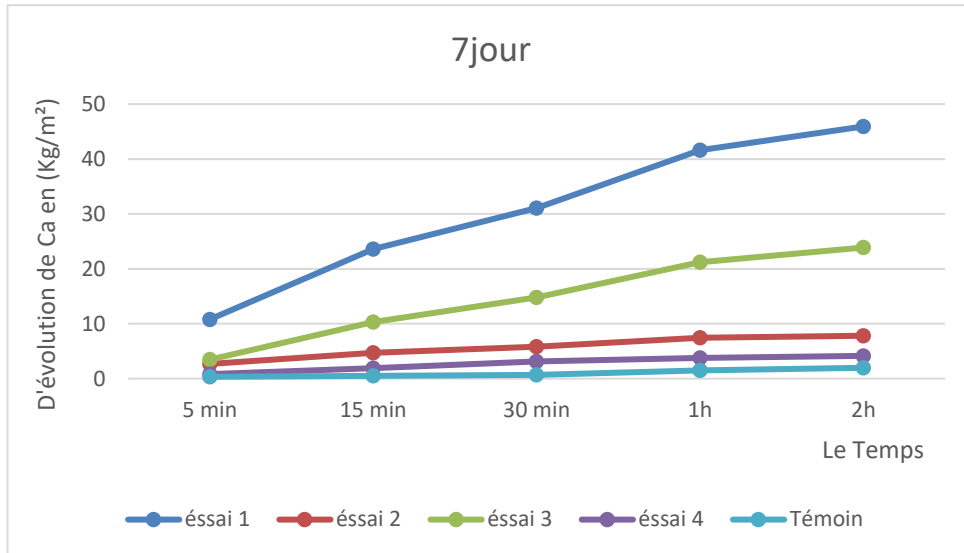


Figure III.7 : La courbe d'évolution de Ca en fonction de temps (7j).

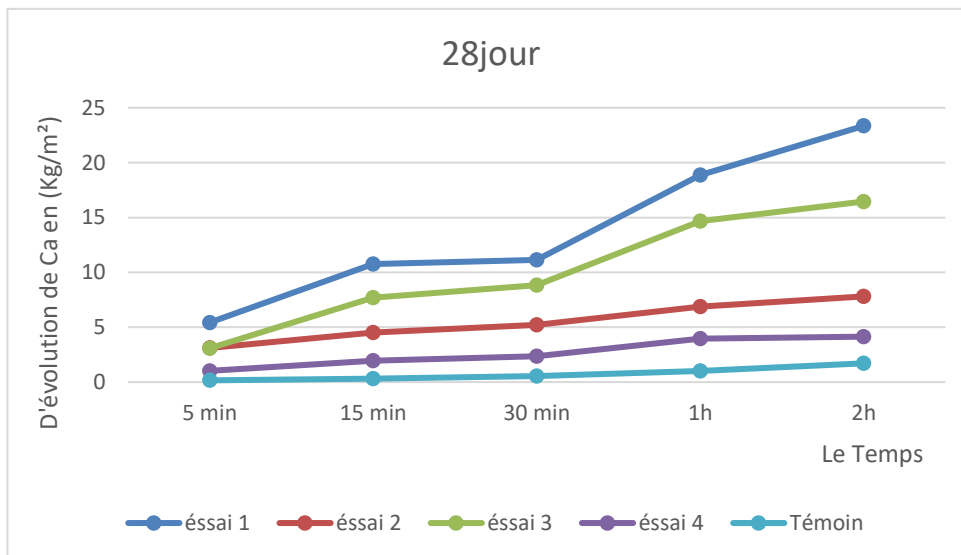


Figure III.8 : La courbe d'évolution de Ca en fonction de temps (28j).

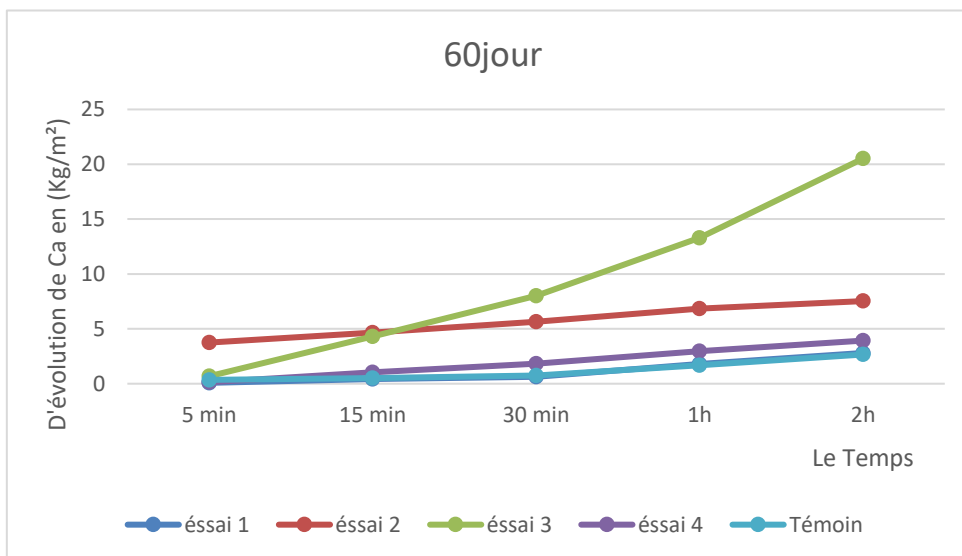
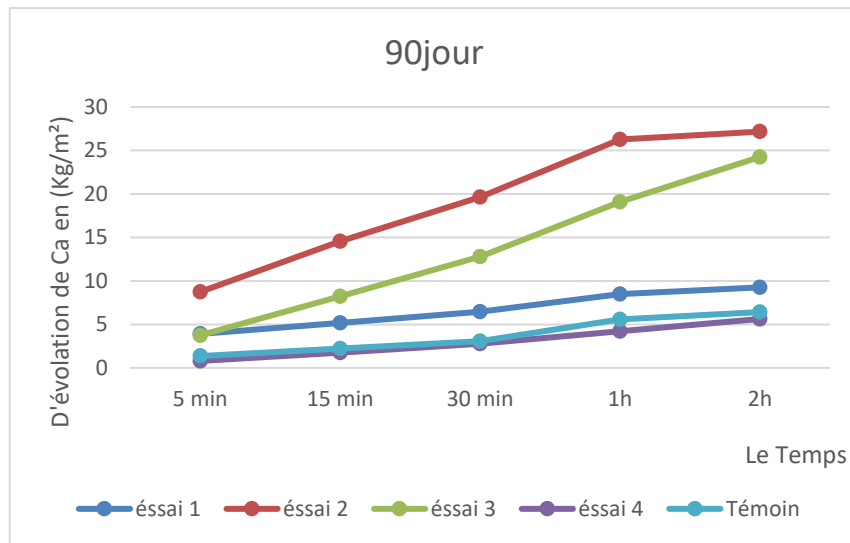


Figure III.9 : La courbe d'évolution de Ca en fonction de temps (60j).



**Figure III.10 :** La courbe d'évolution de Ca en fonction de temps (90j).

-Le graphe montre que seul l'essai 3 présente une évolution significative du Ca sur 7 jours, tandis que les autres essais et le témoin restent proches et à des niveaux faibles. Cela suggère que la variable testée dans l'essai 3 a un impact positif important sur l'évolution du Ca, contrairement aux autres conditions qui ont peu d'effet.

-Après 28 jours, l'essai 3 se distingue nettement par une évolution beaucoup plus importante du Ca, suivi à distance par l'essai 2. Les essais 1 et 4 n'apportent qu'un gain modéré, tandis que le témoin reste très faible. Cela montre l'efficacité particulière de la condition testée dans l'essai 3 pour favoriser l'évolution du Ca sur la durée.

-Le graphe présente l'évolution de la quantité de Ca (en  $\text{kg/m}^2$ ) sur une période de 2 heures après 60 jours pour différents essais et un témoin. On observe que l'essai 3 se distingue nettement des autres, avec une augmentation rapide et continue du Ca, atteignant plus de  $20 \text{ kg/m}^2$  à 2 heures. L'essai 2 montre une progression modérée, autour de  $7 \text{ kg/m}^2$  à la fin de la période. Les essais 1, 4 et le témoin présentent des évolutions similaires et beaucoup plus faibles, ne dépassant pas  $5 \text{ kg/m}^2$ . Ainsi, l'essai 3 est le plus performant, tandis que les autres essais et le témoin affichent des résultats proches et peu évolutifs.

## Conclusion générale

Les résultats expérimentaux ont permis de comparer les différentes formulations de composites à base de pouzzolane, chaux, ciment, perlite et fibres végétales, en mettant en évidence leurs performances thermiques et mécaniques. Il ressort que l'ajout de fibres végétales et de pouzzolane améliore significativement la cohésion, la résistance à la compression et à la flexion, tout en réduisant la fissuration des matériaux. Sur le plan thermique, l'échantillon composé de ciment et de fibres végétales (test 2) présente la conductivité thermique la plus faible, ce qui en fait le meilleur isolant parmi tous les essais réalisés. À l'inverse, le mélange ciment-perlite (test 4) affiche une conductivité plus élevée, indiquant une isolation moins performante. Par ailleurs, tous les composites étudiés surpassent le matériau témoin classique (ciment + sable) en termes d'isolation thermique et de durabilité, tout en conservant des résistances mécaniques adaptées à la construction. Ces résultats confirment l'intérêt de privilégier les formulations intégrant des fibres végétales et de la pouzzolane et ciment et perlite pour obtenir des matériaux de construction à la fois performants, durables et respectueux de l'environnement.

# Références bibliographiques

- ADEME (2020). *Les matériaux biosourcés pour la construction : enjeux, freins et leviers*.
- Allou, F. et al. (2019). *Construction durable : matériaux écologiques et techniques*. Éditions Eyrolles.
- Glé, P. (2017). *Matériaux biosourcés : propriétés physiques et mécaniques*. Techniques de l'Ingénieur.
- Gourlay, E. et al. (2012). *Propriétés des bétons de chanvre : structure et comportement*. Construction and Building Materials.
- Sorel, M. (2021). *Utilisation de l'eau de mer dans la construction : contraintes et solutions*. Revue des Sciences de l'Eau.
- NF P 18-558 (1992). *Essai de détermination de la masse volumique apparente du ciment*.
- RILEM (2010). *Recommandations pour la caractérisation des matériaux cimentaires à base de liants alternatifs*.
- EN 196-1. *Méthodes d'essai des ciments – Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques*.
- Neville, A.M. (2011). *Properties of Concrete*. Pearson Education Limited.
- Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. (2003). *Concrete*. Prentice Hall.
- Khelifi, M. et al. (2021). *Évaluation des performances mécaniques et thermiques de matériaux composites biosourcés*. Revue des Matériaux.
- Elfordy, S. et al. (2008). *Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete*. Construction and Building Materials.
- Lecompte, T. (2019). *Formulation des bétons légers à base de liants alternatifs et de fibres naturelles*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud.
- NF EN 12664. *Comportement thermique des matériaux de construction – Détermination de la conductivité thermique par la méthode de la plaque chaude gardée*.
- NF EN ISO 15148. *Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water absorption coefficient by partial immersion*