

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

*Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj*

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département : Génie Civil*

## ***Mémoire***

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

**FILIERE : Génie Civil**

**Spécialité : Matériaux en Génie civil**

Par

Zouaoui Abdelkhalek

Benbouguerra Taoues

*Intitulé*

Etude des propriétés mécaniques, thermiques et physiques du béton léger à base d'argile expansée renforcé par des fibres de lin.

*Devant le Jury composé de :*

| <i>Nom &amp; Prénom</i>       | <i>Grade</i>      | <i>Qualité</i>      | <i>Etablissement</i> |
|-------------------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| <i>M. Benhcen Mounir</i>      | <i>MCA</i>        | <i>Président</i>    | <i>Univ-BBA</i>      |
| <i>M. Daghfel Moussa</i>      | <i>MCA</i>        | <i>Examineurs</i>   | <i>Univ-BBA</i>      |
| <i>Mlle. Hamla Wafa</i>       | <i>MCA</i>        | <i>Examineurs</i>   | <i>Univ-BBA</i>      |
| <i>M. Noui Ammar</i>          | <i>MCA</i>        | <i>Encadreur</i>    | <i>Univ-BBA</i>      |
| <i>Mlle. Zaidi Amira</i>      | <i>DOCTORANTE</i> | <i>Co-encadreur</i> | <i>Univ-BBA</i>      |
| <i>M. Belkadi Ahmed Raouf</i> | <i>MCA</i>        | <i>Co-encadreur</i> | <i>Univ-BBA</i>      |

*Année Universitaire 2023/2024*

## Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire de génie civil (matériaux de construction) à l'Université de Bordj Bou Arreridj

Nous remercions Dieu tout-puissant de nous avoir accordé la patience, la santé et la volonté de mener à bien ce projet

Nous exprimons notre gratitude à nos familles et spécialement nos parents qui ont tant sacrifié pour nous et nous ont inculqué l'importance de prendre soin de nous et de nous faire confiance, leur amour et leur soutien inconditionnels ont été pour nous une source d'inspiration

Nous voudrions ici témoigner toute nos gratitudes à Monsieur Amar Noui et Monsieur Belkadi Ahmed Raouf nos directeurs de mémoire pour ses disponibilités, ses rigueurs scientifiques et ses encouragements

Nous remercions doctorante Amira Zaidi pour son aide et ses conseils précieux

Nos remerciements vont également à l'ensemble des professeurs du département de Génie Civil de l'Université El Bachir El Ibrahimi, pour leur enseignement de qualité et la connaissance qu'ils m'ont transmises durant mes années d'études. Leur passion et leur dévouement pour la recherche m'ont inspiré et motivé à poursuivre mes propres questionnements scientifiques

Merci également aux membres du jury de ma présentation de mémoire pour avoir accepté de faire partie du jury.

Leurs remarques et suggestions ont été précieuses et m'ont permis d'en améliorer la qualité

Un merci spécial pour mon camarade de projet de fin d'étude pour son soutien indéfectible et sa collaboration tout au long de la rédaction de ce mémoire. Travailler ensemble a été une expérience enrichissante, et je suis reconnaissant pour les compétences et les connaissances que nous avons pu partager et développer ensemble.

Nous ne pouvons pas oublier nos camarades de classe et amis pour leurs encouragements, leurs échanges intellectuels stimulants et pour tous les moments partagés.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Que ce soit à travers des discussions enrichissantes, des conseils ou simplement par leur présence, leur contribution a été précieuse

# **Dédicace**

## **À nos chers pères**

Qui ont toujours été une source de soutien et d'inspiration pour nous. Merci pour toute la tendresse et l'encouragement que vous nous avez offerts tout au long de nos années d'études. Nos succès n'auraient pas été possibles sans votre présence constante à nos côtés. Vous êtes les pères idéaux et l'exemple de dévouement et de générosité. Merci pour tout, nous vous sommes infiniment reconnaissants.

## **À nos chères mamans**

Qui ont toujours été nos incomparables soutiens. Merci pour tout l'amour et les sacrifices que vous nous avez donnés tout au long de notre scolarité. Vous êtes les personnes qui ne nous ont jamais abandonnés et qui ont toujours été là pour nous soutenir et nous motiver. Nous vous sommes très reconnaissants pour tous vos sacrifices et votre amour inconditionnel. Nous espérons que vous êtes aussi fières de toutes nos réussites que nous le sommes de vous en tant que mères. Nous vous aimons beaucoup et nous remercions toujours Dieu pour votre présence dans nos vies.

## **Nos chers frères**

Qui ont toujours été de vrais frères et des amis loyaux. Je vous remercie pour le soutien et l'encouragement que vous m'avez apportés tout au long de mes études. Vous avez toujours été à mes côtés, m'encourageant et me soutenant dans chaque défi ou difficulté. Merci pour tout

**À ma chère sœur** pour ses soutiens moraux

**À mon cher professeur Dr Ammar Noui** qui m'a soutenu et m'a aidé à atteindre ce succès...  
Vous avez été comme un père pour moi Je vous suis reconnaissant pour tous vos efforts.

**À mon binôme** pour sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

## Résumé

Cette étude explore les propriétés des bétons légers incorporant de l'argile expansée et des fibres de lin. L'objectif était d'évaluer l'impact de ces composants sur les caractéristiques mécaniques, physiques et thermiques du béton. Douze mélanges ont été élaborés, combinant différentes proportions d'argile expansée (0%, 30%, 60%, 100%) et de fibres de lin (0%, 0,15%, 0,3%). Une série d'essais a été réalisée, incluant des tests de compression et de flexion à 28 et 90 jours, des mesures de porosité, de densité, de conductivité thermique et de chaleur spécifique.

Les résultats ont montré que l'incorporation d'argile expansée réduit la densité du béton et améliore ses propriétés isolantes, mais diminue sa résistance mécanique. L'ajout de fibres de lin a partiellement compensé cette perte de résistance, particulièrement dans les mélanges contenant de l'argile expansée. Les essais ultrasoniques ont révélé que les fibres de lin réduisent les microfissures, améliorant ainsi la structure interne du béton. La conductivité thermique a diminué avec l'augmentation de la teneur en argile expansée, soulignant le potentiel isolant de ces mélanges. Cette recherche met en lumière les compromis entre légèreté, résistance mécanique et isolation thermique dans les bétons légers. Elle ouvre des perspectives pour le développement de matériaux de construction plus durables, combinant performance structurelle et efficacité énergétique.

Les mots-clés : l'argile expansée, Béton léger, Résistance mécanique, Conductivité thermique, Porosité

## ملخص

تستكشف هذه الدراسة خصائص الخرسانة الخفيفة التي تحتوي على الطين الممدد وألياف الكتان. كان الهدف هو تقييم تأثير هذه المكونات على الخصائص الميكانيكية والفيزيائية والحرارية للخرسانة. تم إعداد اثني عشر خليطاً، تجمع بين نسب مختلفة من الطين الممدد (0%، 30%، 60%، 100%) وألياف الكتان (0%، 0.15%، 0.3%). تم إجراء سلسلة من الاختبارات، بما في ذلك اختبارات الضغط والانحناء عند 28 و90 يوماً، وقياسات المسامية والكثافة والموصلية الحرارية والحرارة النوعية.

أظهرت النتائج أن إدخال الطين الممدد يقلل من كثافة الخرسانة ويحسن خصائصها العازلة، ولكنه يقلل من مقاومتها الميكانيكية. عوضت إضافة ألياف الكتان جزئياً عن هذا الفقدان في المقاومة، خاصة في الخلطات التي تحتوي على الطين الممدد. كشفت الاختبارات فوق الصوتية أن ألياف الكتان تقلل من التشققات الدقيقة، مما يحسن البنية الداخلية للخرسانة. انخفضت الموصلية الحرارية مع زيادة محتوى الطين الممدد، مما يبرز الإمكانيات العازلة لهذه الخلطات. يسلط هذا البحث الضوء على المفاضلات بين الخفة والمقاومة الميكانيكية والعزل الحراري في الخرسانة الخفيفة. إنه يفتح آفاقاً لتطوير مواد بناء أكثر استدامة، تجمع بين الأداء الهيكلي والكفاءة في استخدام الطاق

الكلمات المفتاحية: الطين الموسع، الخرسانة خفيفة الوزن، المقاومة الميكانيكية، الموصلية الحرارية، المسامية

## **Abstract**

This study explores the properties of lightweight concrete incorporating expanded clay and flax fibers. The objective was to evaluate the impact of these components on the mechanical, physical, and thermal characteristics of the concrete. Twelve mixtures were developed, combining different proportions of expanded clay (0%, 30%, 60%, 100%) and flax fibers (0%, 0.15%, 0.3%). A series of tests was conducted, including compression and flexural tests at 28 and 90 days, measurements of porosity, density, thermal conductivity, and specific heat.

The results showed that the incorporation of expanded clay reduces the density of the concrete and improves its insulating properties, but decreases its mechanical resistance. The addition of flax fibers partially compensated for this loss of strength, particularly in mixtures containing expanded clay. Ultrasonic tests revealed that flax fibers reduce microcracks, thus improving the internal structure of the concrete. Thermal conductivity decreased with increasing expanded clay content, highlighting the insulating potential of these mixtures. This research sheds light on the trade-offs between lightness, mechanical strength, and thermal insulation in lightweight concrete. It opens up perspectives for the development of more sustainable construction materials, combining structural performance and energy efficiency.

**Key words:** Expanded clay, Lightweight concrete, Mechanical resistance, Thermal conductivity, Porosity

# Sommaire

|   |    |
|---|----|
| <b>Chapitre I : Les béton légers</b> .....  | 14 |
| I.1. Introduction .....   | 15 |
| I.2. Béton léger .....  | 15 |
| I.3. Avantages de béton léger .....   | 16 |
| I.4. Inconvénients des bétons légers .....  | 16 |
| I.5. Classification et types du béton léger.....  | 17 |
| I.5.1. Classification du béton léger .....  | 17 |
| I.5.2. Types de béton léger.....  | 17 |
| I.5.3. Béton cellulaire.....  | 18 |
| I.5.3.1. Le béton gaz (obtenue par réaction chimique).....  | 18 |
| I.5.3.2. Le béton mousse (obtenue par réaction physique) .....  | 18 |
| I.5.4. Les bétons sans fines (caverneux) .....  | 18 |
| I.5.5. Les bétons de granulats légers.....  | 19 |
| I.5.5.1. Généralité .....   | 19 |
| I.5.5.2. Composition .....  | 19 |
| I.5.5.3. Classification des bétons de granulats légers .....  | 21 |
| I.5.5.3.1. Les bétons de granulats légers naturels.....   | 21 |
| I.5.5.3.2. Les bétons de granulats légers de matériaux ayant subi un traitement thermique .....           | 21 |
| I.5.5.3.3. Les bétons de granulats légers de matériaux artificiels ne subissant pas de traitement spécial | 22 |
| I.5.5.3.4. Les bétons de granulats de matériaux artificiels subissant divers traitements spéciaux         | 22 |
| I.5.5.4. Propriétés et caractéristiques des bétons de granulats légers.....                               | 24 |
| I.5.5.4.1. Résistances .....  | 24 |
| I.5.5.4.2. Ouvrabilité.....   | 24 |
| I.5.5.4.3. Conductivité thermique .....   | 25 |
| I.6. Conclusion.....  | 25 |
| <b>Chapitre II : Revue bibliographique sur l'argile expansée et les Fibres de lin</b> .....               | 26 |
| II.1. Introduction .....  | 27 |
| II.2. Argile expansée .....   | 27 |
| II.2.1. Définition.....   | 27 |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| II.2.2.   | Fabrication de l'argile expansée .....   | 27        |
| II.2.3.   | Conditions de l'expansion.....   | 29        |
| II.2.4.   | Causes de l'expansion .....  | 30        |
| II.2.5.   | Propriétés du béton à base d'argile expansée.....                              | 31        |
| II.2.5.1.   | La maniabilité .....   | 31        |
| II.2.5.2.   | La densité .....   | 31        |
| II.2.5.3.   | La résistance mécanique.....   | 32        |
| II.2.5.4.   | L'isolation phonique et la conductivité thermique .....                        | 32        |
| II.3.   | Fibre de lin .....   | 33        |
| II.3.1.   | Généralités sur les fibres .....   | 33        |
| II.3.2.   | Les fibres végétales .....   | 33        |
| II.3.3.   | Le lin : de la plante à la fibre .....   | 35        |
| II.3.4.   | Composition chimique.....  | 37        |
| II.3.5.   | Propriétés hygroscopiques.....   | 38        |
| II.3.6.   | Propriétés mécaniques .....  | 39        |
| II.3.7.   | Etude des propriétés mécaniques d'un béton renforcé par des fibres de lin..... | 41        |
| II.4.   | Conclusion.....  | 41        |
| <b>Chapitre III : Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essai .....</b> |  | <b>43</b> |
| III.1.  | Introduction .....   | 44        |
| III.2.  | Granulats .....  | 44        |
| III.2.1.  | Sable .....  | 44        |
| III.2.1.1.  | L'équivalent de sable.....   | 44        |
| III.2.1.2.  | L'analyse granulométrique par tamisage .....                                   | 45        |
| III.2.2.  | Argile expansée .....  | 46        |
| III.2.2.1.  | La porosité et l'absorption.....   | 46        |
| III.2.2.2.  | L'analyse granulométrique de l'argile expansé.....                             | 47        |
| III.2.2.3.  | La composition chimique et la masse volumique.....                             | 48        |
| III.2.3.  | Gravier.....   | 49        |
| III.3.  | Ciment .....   | 50        |
| III.3.1.  | Les propriétés de ciment.....  | 51        |
| III.4.  | Fibre de lin .....   | 51        |
| III.5.  | Proportion de mélange .....  | 52        |
| III.6.  | Malaxage et mise en œuvre des éprouvettes.....                                 | 53        |

|   |   |    |
|---|---|----|
| III.6.1.                                  | Malaxage du béton léger.....                            | 53 |
| III.6.2.                                  | Mise en œuvre des éprouvettes.....                      | 55 |
| III.6.3.                                  | Conservation.....                                       | 56 |
| III.7.                                    | Conclusion.....   | 56 |
| Chapitre IV : Résultat et discussion..... |   | 57 |
| IV.1.                                     | Introduction.....                                       | 58 |
| IV.2.                                     | Résultats et discussion.....                            | 58 |
| IV.2.1.                                   | Le béton à l'état frais.....                            | 58 |
| IV.2.1.1.                                 | L'affaissement du béton.....                            | 58 |
| IV.2.1.1.1.                               | Influence du pourcentage d'argile expansé.....          | 59 |
| IV.2.1.1.2.                               | Influence du pourcentage de fibres de lin.....          | 59 |
| IV.2.1.1.3.                               | Comparaison des différents mélanges.....                | 59 |
| IV.2.2.                                   | Le béton à l'état durci.....                            | 62 |
| IV.2.2.1.                                 | La masse volumique :.....                               | 62 |
| IV.2.2.2.                                 | La résistance à la compression.....                     | 64 |
| IV.2.2.3.                                 | Résistance à la flexion.....                            | 67 |
| IV.2.2.4.                                 | La porosité.....  | 70 |
| IV.2.2.4.1.                               | La porosité.....  | 72 |
| IV.2.2.4.2.                               | La densité.....   | 73 |
| IV.2.2.5.                                 | La conductivité thermique et la chaleur spécifique..... | 73 |
| IV.2.2.6.                                 | La chaleur spécifique.....                              | 75 |
| IV.2.2.7.                                 | L'essai ultrasonique.....                               | 75 |
| IV.3.                                     | Conclusion.....   | 76 |

# Liste des Figures

## I. Chapitre : Les bétons légers

|   |    |
|---|----|
| Figure I.1 : Courbes contrainte/déformation de bétons légers confectionnés avec de l'argile expansée : (A) granulats fins et grossiers légers ; (B) granulats fins ordinaires ..... | 16 |
| Figure I.2 : Représentation schématique des différents types de béton léger .....   | 18 |
| Figure I.3: Variation de la résistance en fonction de masse volumique du béton.....   | 24 |

## II. Chapitre : Revue bibliographique sur l'argile expansée et les Fibres de lin

|   |    |
|---|----|
| Figure II.4 : Trous interconnectés et cavités remplies d'air de différentes tailles .....                         | 27 |
| Figure II.5 : L'organigramme de la production d'argile expansée .....   | 28 |
| Figure II.6 : Différentes granulométries de l'argile expansée .....   | 29 |
| Figure II.7 : Trous interconnectés et cavités remplies d'air de différentes tailles .....                         | 31 |
| Figure II.8: Classification des fibres naturelles d'origines végétale et animale .....                            | 34 |
| Figure II.9 : Classification des fibres végétales .....   | 34 |
| Figure II.10 : Représentation schématique de la section d'une tige de lin .....                                   | 35 |
| Figure II.11 : Etapes de la culture du lin de printemps .....   | 36 |
| Figure II.12: Processus d'extraction des fibres de lin .....  | 37 |
| Figure II.13: Cinétique d'absorption d'eau des fibres de lin et de chanvre .....                                  | 39 |
| Figure II.14: Comportement en traction d'une fibre de lin .....   | 40 |
| Figure II.15: Impacts environnementaux de la production de fibre de Lin peigne comparés à la fibre de verre ..... | 40 |

## III. Chapitre : Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essai

|  |    |
|--|----|
| Figure III.16 : Courbes granulométriques de sable de carrière et sable de rivière..... | 45 |
| Figure III.17 : Granulat d'argile expansée 3/8 mm et 8/15.....                         | 46 |
| Figure III.18: Courbe granulométrique de l'argile expansé 3/8, 8/15 .....              | 48 |
| Figure III.19 : Courbe granulométrique de gravier 3/8 et 8/15 .....                    | 50 |
| Figure III.20 : Le ciment Portland Al-Baskariya CEM I 42.5R.....                       | 50 |
| Figure III.22 : Vue rapprochée des fibres de lin.....                                  | 51 |
| Figure III.21 : fibre de lin.....  | 51 |
| Figure III.23 : Quantités de matériaux utilisés .....                                  | 53 |
| Figure III.24 : Malaxage des granulats à sec.....                                      | 53 |
| Figure III.25 : Quantité de fibre de lin .....   | 54 |

|   |    |
|---|----|
| Figure III.26 : Verser le mélange eau/super plastifiant ..... | 54 |
| Figure III.27 : Malaxage de mélange .....                     | 54 |
| Figure III.28 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams .....   | 55 |
| Figure III.29 : Les moules après coulage du béton .....       | 55 |

#### IV. Chapitre : Résultat et discussion

|  |                                    |
|--|------------------------------------|
| Figure III.30 : la conservation des éprouvettes .....  | 56                                 |
| Figure IV.31 : graphique d'affaissement du béton en fonction des mélanges.....                       | 58                                 |
| Figure IV.32 : L'essai de l'affaissement au cône d'Abrams.....                                       | 59                                 |
| Figure IV.33 : L'affaissement de mélange (0 – 0) .....   | 59                                 |
| Figure IV.34 : L'affaissement de mélange (30 – 0) .....  | 60                                 |
| Figure IV.35 : L'affaissement de mélange (30 – 0,15) .....   | 60                                 |
| Figure IV.36 : L'affaissement de mélange (30 – 0,3) .....  | 61                                 |
| Figure IV.37 : L'affaissement de mélange (60 – 0,3) .....  | 61                                 |
| Figure IV.38 : Graphique de la masse volumique à 28 jours .....                                      | 62                                 |
| Figure IV.39 : Courbe de la masse volumique du béton à 28/90 jours .....                             | 63                                 |
| Figure IV.40 : Machine de mesurer la résistance à la compression .....                               | 64                                 |
| Figure IV.41 : Graphique de la résistance à la compression à 28 jours en fonction des mélanges ..... | 64                                 |
| Figure IV.42 : Graphique de la résistance à la compression à 90 jours en fonction des mélanges ..... | 65                                 |
| Figure IV.43 : Machine de mesurer la résistance à la flexion.....                                    | 67                                 |
| Figure IV.44 : Graphique de la résistance à la flexion à 28 jours en fonction des mélanges .         | 68                                 |
| Figure IV.45 : Graphique de la résistance à la flexion à 90 jours en fonction des mélanges .         | 69                                 |
| Figure IV.46 : Balance hydrostatique.....  | 71                                 |
| Figure IV.47 : Graphique de la porosité en fonction des mélanges .....                               | 72                                 |
| Figure IV.48 : Graphique de l'absorption en fonction des mélanges                                    | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |
| Figure IV.49 : La densité calculé et la densité pesée en fonction des mélanges.....                  | 73                                 |
| Figure IV.50 : La conductivité thermique en fonction des mélanges .....                              | 74                                 |
| Figure 51 : La chaleur spécifique en fonction des mélanges .....                                     | 75                                 |

# Liste des tableaux

## I. Chapitre : Les béton légers

|   |    |
|---|----|
| Tableau I.1 : Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87 .....                                 | 17 |
| Tableau I.2 : Classification Des Bétons Légers En Fonction De La Densité.....                                   | 17 |
| Tableau I.3 : Classification Des Bétons Légers En Fonction De la masse volumique .....                          | 17 |
| Tableau I.4 : Pourcentage d'absorption du béton de granulats légers en fonction du temps .                      | 20 |
| Tableau I.5 : Renseignements de chantier pour des granulats d'argile expansée stockés en tas .....              | 21 |
| Tableau I.6 : Classification des matières premières minérales pour la fabrication de granulats .....            | 23 |
| Tableau I.7 : Le coefficient $\lambda_u$ par rapport à la masse volumétrique pour certains types de béton ..... | 25 |

## II. Chapitre : Revue bibliographique sur l'argile expansée et les Fibres de lin

|  |    |
|--|----|
| Tableau II.8 : Pourcentages massiques des constituants de différentes fibres végétales ..... | 37 |
| Tableau II.9 : Coefficient d'absorption d'eau de différentes fibres végétales .....          | 38 |

## III. Chapitre : Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essai

|   |    |
|---|----|
| Tableau III.10 : Equivalent de sable de carrière ( EN 933-8) .....                              | 44 |
| Tableau III.11 : Equivalent du sable de rivière (EN 933-8).....                                 | 44 |
| Tableau III.12 : La porosité d'argile expansée.....   | 46 |
| Tableau III.13 : L'absorption par immersion totale d'argile expansée .....                      | 47 |
| Tableau III.14: Analyse chimique de l'argile schisteuse de BOUINAN ( ALGEXPAN - ALGERIE ) ..... | 49 |
| Tableau III.15 : La masse volumique d'argiles expansée .....                                    | 49 |
| Tableau III.16 : Propriétés de ciment Portland Al-Baskariya CEM I 42.5R .....                   | 51 |
| Tableau III.17 : Propriétés des fibres de lin .....   | 52 |
| Tableau III.18 : Les formulation des bétons .....   | 52 |

## IV. Chapitre : Résultat et discussion

|   |                                    |
|---|------------------------------------|
| Tableau IV.19 : La masse volumique du béton à 28 j et à 90 j .....  | 63                                 |
| Tableau IV.20 : la résistance à la compression 28 et 90 jours ..... | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |
| Tableau IV.21 : la résistance à la compression 28 et 90 jours ..... | 70                                 |

|   |    |
|---|----|
| Tableau IV.22 : Porosité accessible à l'eau .....                 | 71 |
| Tableau IV.23 : Conductivité thermique et chaleur spécifique..... | 74 |

## Introduction générale

L'industrie de la construction est en constante évolution, confrontée à des défis majeurs tels que la **demande croissante en logement**, la **nécessité de réduire l'impact environnemental** des bâtiments et la **recherche de solutions plus économiques et performantes**. Le béton ordinaire est un béton dont la masse volumique limite les utilisations et conduit à des pièces peu élancées nécessitant des fondations profondes. Dans ce contexte, les **bétons légers** se présentent comme une alternative prometteuse aux bétons traditionnels, offrant de nombreux avantages pour une construction durable et moderne.

**Parmi les types de bétons légers, les bétons à base d'argile expansée** suscitent un intérêt particulier en raison de leurs propriétés remarquables. L'argile expansée, un granulats légers issu de l'argile naturelle, confère au béton une **densité réduite**, une **meilleure isolation thermique et acoustique**, une **résistance accrue au feu** et une **facilité de mise en œuvre**.

**Cependant, les bétons légers d'argile expansée peuvent présenter une résistance à la compression moindre** comparée aux bétons traditionnels. Pallier cette limitation, des recherches récentes se sont penchées sur le **renforcement de ces bétons par des fibres de lin**. Le lin, une fibre naturelle aux propriétés mécaniques intéressantes, offre une alternative écologique et performante.

**Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres** qui explorent en profondeur les bétons légers d'argile expansée renforcés par des fibres de lin :

Le premier chapitre comporte une étude bibliographique sur les bétons légers, leur type et leur classification ainsi qu'une étude spécifique sur les bétons de granulats légers

Le deuxième chapitre a concerné une étude approfondie sur l'argile expansée et les fibres de lin leurs fabrications et leurs propriétés

Le troisième chapitre est consacré à la caractérisation physique des constituants (sable, gravier, argile expansée, fibre de lin) entrant dans la formulation de béton de granulats légers

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats de l'étude expérimentale et à leur discussion.

# **I. Chapitre**

## Les bétons légers

## I.1. Introduction

Le béton est le terme générique désignant les matériaux de construction composites constitués de granulats (sable, pierre concassée) liés par un liant.

Le béton léger utilisé dans la fabrication d'éléments structurels porteurs est généralement fabriqué à partir de granulats manufacturés légers (argile, schiste expansé, laitier ou cendres volantes frittées).

Ce chapitre propose une définition complète du béton léger, en abordant ces différents types et classifications. Une attention particulière est portée au béton de granulats légers, dont les caractéristiques et les applications sont détaillées.

## I.2. Béton léger

Le béton léger est un type de béton spécial qui devrait trouver de nouvelles applications grâce à ses propriétés. Il diffère du béton normal en ce qu'il a une densité plus faible. La masse d'un béton de densité normale est comprise entre 2 200 et 2 600 kg/m<sup>3</sup>, tandis que celle d'un béton léger est comprise entre 300 et 1 850 kg/m<sup>3</sup> [1]

Le Comité R.I.L.E.M (Réunion internationale des laboratoires et experts des matériaux, systèmes de construction et ouvrages) Béton Léger propose de définir le béton léger comme un béton dont la masse volumique apparente sèche est inférieure à 1 800 kg/m<sup>3</sup>. CORMON a proposé qu'une masse volumique apparente après 28 jours dans des conditions normales de stockage (température de 20° et humidité relative de 65%) inférieure à 1800 kg/m<sup>3</sup> (1973) est appelé béton léger. De même, L'American Concrete Institute limite la densité apparente du béton après 28 jours de séchage à l'air à 1 800 kg/m<sup>3</sup>. SHORT et KINNIBURG, quant à eux, considèrent que la densité apparente sèche du béton léger doit être inférieure à 1 775 kg/m<sup>3</sup>. En Allemagne, la norme DIN 1 042, publiée en 1 972, limite la densité apparente du béton léger à 2000 kg/m<sup>3</sup>. La densité finale après séchage se situe entre 800 et 2 100 kg/m<sup>3</sup> lorsque des granulats légers sont utilisés en tout ou en partie. Il est donc très difficile de donner une définition précise du béton en se basant sur la limite supérieure de la densité apparente. Cependant, la définition donnée par CORMON semble être la plus intéressante car elle est proche des limites de densité généralement admises et surtout la plus précise quant aux conditions de stockage et à la date de mesure du béton [2]

Comme nous l'avons vu, le béton léger est un béton dont la densité est inférieure à 1 800 kg/m<sup>3</sup>.

### I.3. Avantages de béton léger

Le béton léger offre plusieurs avantages notables. Premièrement, il réduit le poids propre des bâtiments, ce qui allège considérablement la taille et le poids des fondations nécessaires. Cette légèreté améliore également la productivité sur les chantiers de construction. Comme moins de béton est utilisé, il est possible d'économiser sur la quantité de ciment par rapport au béton normal. Deuxièmement, les éléments en béton léger présentent une excellente qualité de finition, principalement parce qu'ils sont fabriqués en usine dans des conditions contrôlées. De plus, leur poids réduit les rend faciles à manipuler et à déplacer. Enfin, tout comme pour d'autres bétons légers, la conductivité thermique du béton léger varie en fonction de sa densité, augmentant linéairement avec sa teneur en eau. [3]

### I.4. Inconvénients des bétons légers

Les inconvénients du béton léger, selon Neville, sont nombreux. Tout d'abord, le béton léger présente des résistances mécaniques inférieures à celles d'un béton ordinaire. De plus, son module élastique étant plus faible, sa résistance à la déformation, sa flèche et son point de rupture sont également plus faibles. En outre, l'utilisation de granulats légers (granulats expansés) entraîne un coût plus élevé, ce qui fait que le prix par mètre cube de béton léger est supérieur à celui des bétons ordinaires. Le béton léger est également un matériau fragile : sa courbe contrainte-dilatation ne comporte pas de plateau plastique comme l'acier, entraînant une rupture fragile dès que le point de rupture est atteint, ce qui est à éviter pour les structures de construction. Enfin, la mise en œuvre sur le chantier doit être plus délicate en raison de cette fragilité, surtout pour les pièces de grandes dimensions [1]

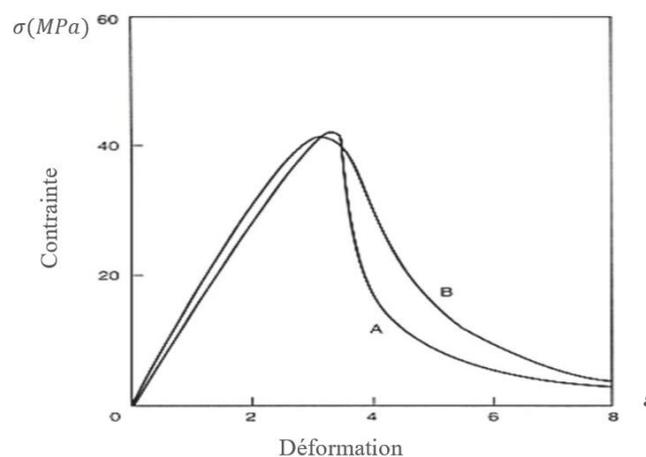


Figure I.1 : Courbes contrainte/déformation de bétons légers confectionnés avec de l'argile expansée : (A) granulats fins et grossiers légers ; (B) granulats fins ordinaires [4]

## I.5. Classification et types du béton léger

### I.5.1. Classification du béton léger

L'augmentation du volume d'air, ou des vides, s'accompagne d'une diminution de la résistance du matériau. Le guide ACI 213R-87 distingue alors trois catégories de béton léger, classées selon la masse volumique du matériau durci (tableau I.1).

**Tableau I.1 : Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87 [5]**

| Classification                      | $\rho_b$ (Kg/m <sup>3</sup> ) | $f_c$ (MPa) |
|-------------------------------------|-------------------------------|-------------|
| Bétons légers de structure          | 1350 - 1900                   | > 17        |
| Bétons légers de résistance modérée | 800 - 1350                    | 7 - 17      |
| Bétons de faible densité            | 300 - 800                     | < 7         |

La norme classe les bétons légers dans les 6 catégories de densités suivantes, fonction de leur masse en kg/m<sup>3</sup>.

**Tableau I.2 : Classification Des Bétons Légers En Fonction De La Densité [5]**

| Classe de densité | 1,0              | 1,20              | 1,4               | 1,6               | 1,8               | 2,0               |
|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Kg/m <sup>3</sup> | 901<br>à<br>1000 | 1001<br>à<br>1200 | 1201<br>à<br>1400 | 1401<br>à<br>1600 | 1601<br>à<br>1800 | 1801<br>à<br>2000 |

**Tableau I.3 : Classification Des Bétons Légers En Fonction De la masse volumique [5]**

| Classe de masse volumique | LC1,0             | LC1,20             | LC1,4              | LC1,6              | LC1,8              | LC2,0              |
|---------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Kg/m <sup>3</sup>         | > 800et<br>≤ 1000 | > 1000et<br>≤ 1200 | > 1200et<br>≤ 1400 | > 1400et<br>≤ 1600 | > 1600et<br>≤ 1800 | > 1800et<br>≤ 2100 |

### I.5.2. Types de béton léger

Les types de béton légers varient en fonction de la manière dont l'air est introduit dans le béton ce qui peut se faire à trois endroits différents :

- ❖ Dans la matrice (béton cellulaire) ;
- ❖ Entre les gros granulats (béton caverneux ou sans granulométrie, c'est-à-dire sans sable)
- ❖ Dans les granulats (béton de granulats légers) ; [5]

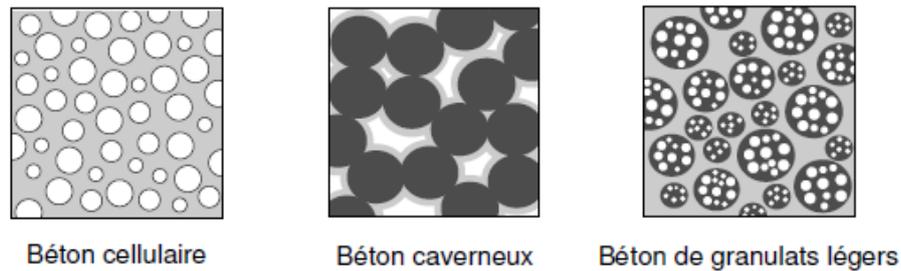


Figure I.2 : Représentation schématique des différents types de béton léger [5]

### I.5.3. Béton cellulaire

Le béton cellulaire est un matériau léger d'aspect très poreux et de couleur généralement blanchâtre ou grise. Leur nom vient de la structure de leurs alvéoles. En fait, ils contiennent un grand nombre de petites cavités sphériques qui ne communiquent pas entre elles et leur taille est d'environ 1 millimètre. Le béton cellulaire peut être classé en 2 catégories selon le procédé de fabrication :

#### I.5.3.1. Le béton gaz (obtenue par réaction chimique)

Où les alvéoles sont obtenues par l'adjonction d'un produit chimique générateur de gaz jouant le rôle d'une levure (poudre d'aluminium ou de zinc, eau oxygénée, ou carbures de calcium par exemple). [6]

#### I.5.3.2. Le béton mousse (obtenue par réaction physique)

Où les cavités résultent de l'adjonction de substances qui moussent sous l'action d'un malaxage (détergents, savons, résines spéciales) Le béton cellulaire peut être obtenu avec des densités variant de 0,200 à 1,800 et des conductivités thermiques de 0,116 à 0,700 W/(mK) en fonction des domaines d'utilisation [7]

### I.5.4. Les bétons sans fines (caverneux)

Béton léger, poreux, avec une grande porosité due à l'absence de sable ou de grains fins. Granulats grossiers (normaux ou légers) enrobés de pâte de ciment ou de mortier, étalés en couche épaisse (au moins 50 cm) et appliqués par fosse. Il est utilisé comme béton de remplissage ou pour empêcher les remontées capillaires.

Le béton de cavité se caractérise par une très grande porosité due à des vides entre les granulats ou dans le ciment en raison d'une teneur élevée en eau. Ce béton est un matériau aux nombreuses applications potentielles :

- Il possède également de bonnes propriétés mécaniques. Le béton de cavité peut être utilisé pour remplir la structure poteau-poutre, bien qu'il ne soit pas suffisant pour assurer une réduction significative de la charge.
- Cela signifie que l'eau n'est pas arrêtée par ce mur et qu'elle circule librement.
- Absorption sonore élevée grâce à de nombreuses cavités.
- En raison de sa surface irrégulière, il présente une grande surface d'air, ce qui en fait un matériau idéal pour les plantes de surface telles que les mousses et les lichens.
- Son aspect inhabituel donne lieu à une variété d'utilisations esthétiques. [8]

## **I.5.5. Les bétons de granulats légers**

### **I.5.5.1. Généralité**

Dans la construction de nombreuses structures, la réduction du poids est susceptible d'entraîner des économies générales. L'utilisation de granulats légers permet de produire des bétons dont la densité varie de 0,5 à 2,0, mais la résistance à la compression est plus faible à des densités inférieures. Le béton de vermiculite d'une densité moyenne de 0,5 a une résistance à la compression de seulement 2 à 5 MPa, tandis que le béton d'argile ou de schiste expansé d'une densité de 1,7 à 1,9, utilisant des granulats légers de bonne qualité, peut atteindre 40 MPa.

Le béton léger peut être utilisé dans la construction de structures porteuses (poutres, dalles, colonnes, etc.), notamment dans la production d'agglomérés, de béton de coffrage non porteur ou légèrement porteur et de béton isolant.

De nombreuses structures importantes ont été construites en béton léger, notamment des ponts en béton armé et précontraint, des bâtiments et des toitures à parois minces. Toutefois, après une brève pandémie, l'utilisation du béton léger s'est ralentie et se limite désormais à des éléments préfabriqués. [8]

### **I.5.5.2. Composition**

D'une manière générale, le principe de détermination des proportions de mélange pour la fabrication du béton de granulats légers est pratiquement le même que pour le béton conventionnel. Cependant, comme un nouveau paramètre, la densité souhaitée, apparaît dans l'énoncé du problème, des méthodes de mélange prenant en compte ce paramètre sont étudiées. Le calcul du volume des granulats se fait en termes de volume absolu, mais la proportionnalité du poids nécessite la connaissance de la masse spécifique du granulat pré-mélangé, ce qui n'est généralement pas très précis. Presque tous les agrégats ont une tendance marquée à absorber

l'eau. Par exemple, pour les granulats d'argile expansée de 10/20 mm, les taux d'absorption pondérale sont donnés comme valeurs moyennes dans les tableaux 4 et 5.

En cas d'immersion sous vide, le taux d'absorption peut dépasser 75 % pour les plus gros granulats. Cette tendance est due à la porosité "ouverte" de l'agrégat, qui est moins prononcée lorsqu'il est superficiellement "vitrifié", c'est-à-dire qu'il présente une surface lisse qui n'est pas très "ouverte".

En outre, selon le degré d'imprégnation, le dépassement peut être important, surtout dans le cas de composants fins tels que le sable concassé fabriqué à partir d'agrégats légers.

Il en résulte essentiellement deux conséquences :

- Le dosage volumétrique doit généralement être utilisé à moins que la proportion d'eau absorbée puisse être contrôlée efficacement et prise en compte en augmentant le poids de l'agrégat, qui est supposé être à l'état sec dans la formule de dosage.
- L'absorption importante d'eau, qui se produit dès le début du mélange, entraîne une diminution progressive et rapide de la teneur en eau intergranulaire et donc de la plasticité du béton. Il est donc souhaitable de pré-humidifier ces matériaux afin de retarder cette absorption d'eau et de maintenir la plasticité du matériau plus ou moins stable, au moins pendant la période d'utilisation. Dans le cas des argiles expansées, certains experts recommandent une pré-humidification, qui entraîne une absorption d'eau d'environ 10-15% en poids, tandis que d'autres recommandent l'utilisation de granulats drainés saturés.

Cependant, ces matériaux sont trop différents d'un matériau à l'autre pour appliquer une loi commune, de sorte qu'une fois qu'une formule de dosage à peu près raisonnable a été rapidement déterminée, l'expérimentation par des essais joue un rôle encore plus important et nécessaire que pour le béton de granulats denses conventionnel. [8]

**Tableau I4 : Pourcentage d'absorption du béton de granulats légers en fonction du temps [8]**

| Au bout de        | 5 min | 1 heure | 8 heures | 1 jour | 7 jours | 28 jours |
|-------------------|-------|---------|----------|--------|---------|----------|
| Absorption forte  | 10%   | 15%     | 20%      | 23%    | 30%     | 45%      |
| Absorption faible | 5%    | 7%      | 10%      | 12%    | 15%     | 15%      |

Absorption d'eau (somme de l'absorption et de l'adsorption d'eau) par poids de granulats légers. Ces valeurs ne sont données qu'à titre de référence car elles varient considérablement d'un granulat à l'autre et avec un drainage plus ou moins important du granulat.

**Tableau I.5 : Renseignements de chantier pour des granulats d'argile expansée stockés en tas [8]**

|   | Pour 1 mètre cube de volume apparent d'argile expansée (non tassé) |                 |
|---|--|-----------------|
|   | Gravier 10/20  | Sable broyé 0/3 |
| Masse volumique (en Kg) $\left\{ \begin{array}{l} moullé \dots\dots\dots \\ sec \dots\dots\dots \end{array} \right.$                  | 510<br>400   | 1 000<br>670    |
| Teneur en eau (en poids relatifs) .....   | 27%  | 50%             |
| Volume absolu en litres.....  | 500  | 725             |
| Masse spécifique (en Kg/m <sup>3</sup> ) $\left\{ \begin{array}{l} moullé \dots\dots\dots \\ sec \dots\dots\dots \end{array} \right.$ | 1 020<br>800   | 1 380<br>920    |
| Densité apparente $\left\{ \begin{array}{l} moullé \dots\dots\dots \\ sec \dots\dots\dots \end{array} \right.$                        | 0,51<br>0,40   | 1,00<br>0,68    |

Renseignements de chantier pour des granulats d'argile expansée stockés en tas et arrosés régulièrement au jet pour maintenir une saturation d'eau approximative.

### **I.5.5.3. Classification des bétons de granulats légers**

Le béton de granulats légers est fabriqué de la même manière que le béton normal, mais avec des granulats légers. Il existe de nombreux types de béton de granulats légers et ils peuvent être classés de différentes manières ; Cormon propose une classification basée sur l'origine du granulat et quatre groupes principaux peuvent être distingués. [2]

#### **I.5.5.3.1. Les bétons de granulats légers naturels**

Ces bétons sont fabriqués à partir de pierre ponce ou de pouzzolane, un matériau volcanique naturel à la structure très poreuse qui peut être broyé pour produire des granulats légers. Ces matériaux sont relativement peu connus en Algérie et leurs utilisations restent à établir, mais il n'est pas exclu qu'ils puissent être avantageux pour certaines réalisations dans le futur en raison de certaines de leurs propriétés.

#### **I.5.5.3.2. Les bétons de granulats légers de matériaux ayant subi un traitement thermique**

Il s'agit de bétons constitués d'argile, de schiste, d'ardoise, de perlite expansée ou d'agrégats de vermiculite exfoliée.

La perlite expansée est obtenue par traitement thermique d'un verre volcanique (comme la rhyolite perlitique) à structure perlitique contenant une certaine quantité d'eau. Cet agrégat n'est pas produit en Algérie et l'est principalement aux États-Unis et en URSS.

**I.5.5.3.3. Les bétons de granulats légers de matériaux artificiels ne subissant pas de traitement spécial**

Il s'agit d'un béton fabriqué à partir de clinker, un sous-produit de la combustion du charbon et des déchets ménagers.

Ce matériau a été considérablement épuisé et n'est plus utilisé que pour fabriquer des parpaings.

**I.5.5.3.4. Les bétons de granulats de matériaux artificiels subissant divers traitements spéciaux**

Laitier de haut fourneau : divers déchets industriels peuvent être utilisés dans la production d'agrégats légers tels que EL-HADJAR. Les cendres volantes peuvent être frittées et le verre peut être expansé. [2]

Tableau L6 : Classification des matières premières minérales pour la fabrication de granulats [9]

| Matières premières artificielles | Matières premières naturelles          |  |  |                                  |  |  |
|----------------------------------|--|--|--|----------------------------------|--|--|
|                                  | Sans traitement thermique              | Démolition   | Décombres, briquillons cendres de foyers   | Décombres, briquillons mâchefers | ---  | Empois occasionnels                                |
| Avec traitement thermique        | Sédimentaire à épi métamorphique       | Argiles  | Argile expansée (Thermomousse) (Mousse d' argile) Gravillons céramiques creux Schistes expansés Ardoise expansée | 35 000<br>---<br>---             | 2 usines (+2 usines arrêtées) Au stade des études d° | Usine pilote surex (production arrêtée)<br>1 usine |
|                                  |  |  |  |                                  |  |  |
| Avec traitement thermique        | Sédimentaire                           | Calcaires poreux<br>Calcaires coquilliers<br>Tufs calcaires<br>Diatomites<br>Spongolites<br>Gaizes | Diatomite<br>Diatomite calcinée  | 220 000<br>---                   | Production mondiale :<br>1 954 Mt                    | Emplois signalés aux USA et URSS                   |
|                                  |  |  |  |                                  |  |  |
| Sous-produits industriels        | Cendres volantes<br>Laitiers<br>Calcin | Mâchefers frités<br>Cendres volantes frittées<br>Laitier expansé<br>Verre expansé                  | ---  | ---                              | ---  | ---  |

### I.5.5.4. Propriétés et caractéristiques des bétons de granulats légers

#### I.5.5.4.1. Résistances

La résistance du béton de granulat léger est moins élevée que pour les bétons classiques de granulats denses. Ainsi, la diminution de la résistance du béton de granulat léger est due à sa plus faible densité

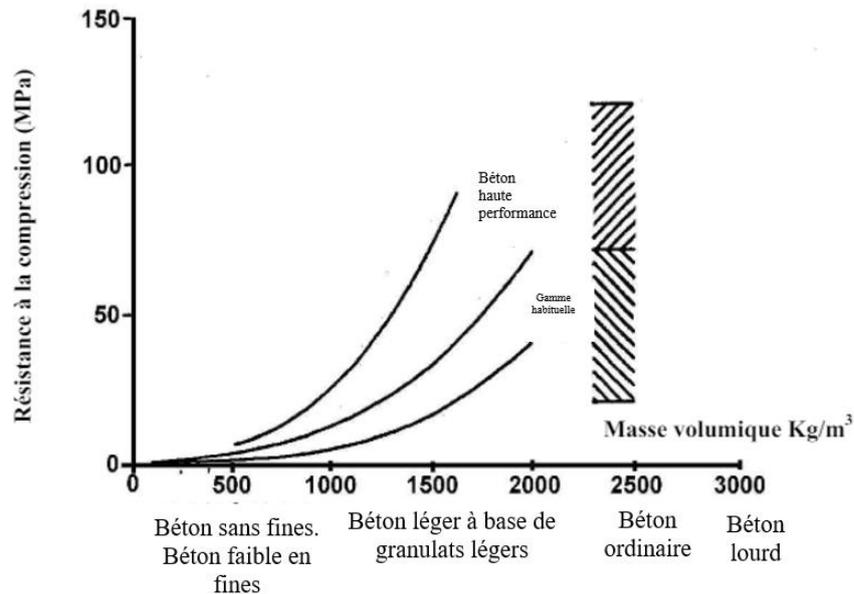


Figure I.3: Variation de la résistance en fonction de masse volumique du béton. [10]

La résistance intrinsèque des matériaux constituant les agrégats légers est évidemment un paramètre important. Par conséquent, étant donné la variabilité de la qualité des différents granulats légers, il est nécessaire d'effectuer des essais sur des spécimens pour clarifier ce paramètre fondamental.

Dans le béton structurel, l'utilisation de granulats de bonne qualité et de sable naturel semble permettre d'atteindre des résistances de l'ordre de 30-35 MPa à 28 jours, bien qu'avec des ajouts de ciment légèrement supérieurs à ceux d'un béton conventionnel de même résistance. [8]

#### I.5.5.4.2. Ouvrabilité

Le béton de granulats légers est généralement moins facile à travailler que le béton conventionnel. Toutefois, il est possible d'obtenir une ouvrabilité relativement aisée en considérant la composition optimale (notamment la finesse et la quantité de sable) et la quantité d'eau, et en utilisant éventuellement un adjuvant. Les entraîneurs d'air sont considérés comme préférables, mais peuvent causer certaines difficultés dans le cas de l'ouvrabilité par pompage à distance (effet de ressort).

La mesure de l'affaissement du cône n'est pas aussi importante que pour les bétons fabriqués à partir de matériaux denses, en particulier les bétons dont la teneur en ciment est inférieure à 350

kg/m<sup>3</sup> ; l'essai d'ouvrabilité doit être utilisé, car il s'agit de la meilleure méthode pour déterminer l'affaissement du cône. [8]

#### I.5.5.4.3. Conductivité thermique

L'une des propriétés intéressantes du béton de granulats légers est sa propriété adiabatique due au grand nombre de bulles d'air intercalées dans l'épaisseur du béton. Cette propriété adiabatique est caractérisée par la conductivité thermique  $\lambda_u$  (la quantité de chaleur qu'un matériau de 1 cm d'épaisseur transmet en une unité de temps lorsque la différence de température entre deux surfaces est de 1°C).

Le béton entièrement sec est plus isolant que le béton humide, et un coefficient utile ' $\lambda$ ' a été défini, correspondant à un taux d'humidité interne moyen d'environ 4%.

Pour un béton conventionnel d'une densité de 2 200-2 400 kg/m<sup>3</sup>, le coefficient  $\lambda_u$  moyen est de 1,5 (Kcal/m/h/1°C). Pour le béton de granulats légers, les valeurs suivantes sont actuellement acceptées : [8]

**Tableau I.7 : Le coefficient  $\lambda_u$  par rapport à la masse volumétrique pour certains types de béton [8]**

|  | Masse volumique sèche (kg/m <sup>3</sup> ) | $\lambda_u$ en Kcal/m/h/1°C <sub>v</sub> |
|--|--|--|
| Béton caverneux normal                           | 800/1 000                                  | 0,30                                     |
| Béton plein avec sable léger                     | 1 000/1 200                                | 0,40                                     |
| Béton plein avec sable léger et sable de rivière | 1 200/1 400                                | 0,60                                     |
| Béton plein avec sable de rivière                | 1 400/1 600                                | 0,75                                     |

## I.6. Conclusion

Bien que le béton léger présente des avantages et des propriétés prometteuses, comme démontré dans le premier chapitre, sa résistance à la traction et à la compression demeure inférieure à celle du béton ordinaire. En réponse à cette limitation par l'incorporation d'argile expansée et de fibres de lin dans le béton léger afin d'évaluer leur impact sur ses performances.

Dans le deuxième chapitre, nous explorons les propriétés individuelles de l'argile expansée et des fibres de lin pour mieux comprendre leur potentiel d'amélioration du béton léger.

## **II. Chapitre**

Revue bibliographique sur l'argile expansée  
et les Fibres de lin

## II.1. Introduction

La fibre de lin et l'argile expansée sont deux matériaux de construction polyvalents qui gagnent en popularité en raison de leurs propriétés et de leurs performances dans le béton. La fabrication de ces matériaux a un impact significatif sur les propriétés du béton léger.

Ce chapitre décrit les différentes étapes de fabrication de l'argile expansée et de fibre de lin, ainsi que leurs effets sur les propriétés du béton léger.

## II.2. Argile expansée

### II.2.1. Définition

L'argile expansée est obtenue par cuisson à haute température (1 000 à 1250°C environ) de granules d'argile préalablement mis en forme par moulage (type ARG1-16, ARG1-OUEST en France) ou déchiquetage (type LECA-France). Au cours de l'élévation de température un dégagement gazeux variable selon les argiles utilisées, provoque l'apparition de pores millimétriques à l'intérieur du matériau pyroplastique. [9]

### II.2.2. Fabrication de l'argile expansée

La fabrication de l'argile expansée a démarré en Septembre 1977 en Algérie. Cette unité située à Bouinan (wilaya de Blida) à proximité d'un important gisement a été conçue au départ en collaboration étroite avec l'usine de préfabrication de Sidi- Moussa dans le but de préfabriquer des panneaux porteurs d'argile expansée. [11]



Figure II.4 : Trous interconnectés et cavités remplies d'air de différentes tailles [12]

La fabrication de l'argile expansée est une technique assez délicate car plusieurs facteurs interviennent en même temps, tels que le choix des argiles, leur granulométrie et les températures de cuisson.

Sous l'action de fortes températures (1100°C-1300°C), certaines argiles possèdent la propriété de gonfler à la suite d'un dégagement de gaz lié au ramollissement de la matière. Parallèlement, une peau extérieure se forme par vitrification à la surface du matériau. Après refroidissement, on obtient un produit léger à texture alvéolaire très marquée, de couleur grisâtre et de forme plus ou moins arrondie. [11]



Figure II.5 : L'organigramme de la production d'argile expansée [13]

La composition granulométrique de l'argile brute est très importante pour l'expansion. Il faut éviter que la matière première comporte beaucoup de gros éléments ou des éléments trop fins pour éviter une grande perméabilité de l'argile aux gaz et une préparation difficile des nodules. [11]



Figure II.6 : Différentes granulométries de l'argile expansée [13]

### II.2.3. Conditions de l'expansion

Pour que le gonflement ait lieu, il faut que la matière première satisfasse à deux conditions :

- Viscosité favorable (inférieure à environ 1 250°C) dans une plage de températures suffisamment large pour être suffisamment basse pour que le procédé soit industriellement viable et économiquement rentable. ;
- L'apparition d'un dégagement gazeux dans cette même plage de température. Si le gaz est libéré à une température plus basse, la pression générée par le gaz n'est pas suffisante pour repousser la pâte trop dure et la porosité encore ouverte permettra aux gaz de s'échapper.

La capacité gonflante de l'argile est mesurée par le taux d'expansion, qui est le rapport du volume final au volume sec initial. On pense que pour que le produit fini soit commercialisable, le taux d'expansion doit être supérieur à 1,5, c'est-à-dire que la densité apparente doit être inférieure à environ 0,70. La densité la plus faible obtenue avec de l'argile expansée est de 0,30 ; exceptionnellement 0,25 correspond à des taux d'expansion extrêmes de 3, exceptionnellement 4.

Les taux d'expansion supérieurs à 5, couramment obtenus dans les fours de laboratoire statiques, ne peuvent pas être déplacés vers des installations industrielles. Ils correspondent au dépassement de la température limite industrielle, qui est la température à laquelle les grains d'argile commencent à se coller ensemble ou sur les parois réfractaires du four rotatif.

Le résultat de l'expansion peut être lié dans une certaine mesure aux propriétés de la matière première, en particulier sa granulométrie, sa composition chimique et par conséquent minéralogique. D'autres caractéristiques, telles que la méthode de dépôt, la géométrie des sédiments, les fluctuations locales de la phase, n'interviennent pas directement dans l'expansion du matériau, mais dans la possibilité de son exploitation. [9]

#### II.2.4. Causes de l'expansion

Depuis sa première commercialisation en 1917, de nombreuses recherches ont été menées sur la nature des réactions chimiques qui produisent les gaz nécessaires à l'expansion. L'analyse des gaz bloqués dans les pores de l'argile de diverses propriétés montre que le CO<sub>2</sub> est toujours présent et dans certains cas avec CO, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>.

Sur ces bases, plusieurs hypothèses ont été émises concernant l'origine des gaz, en particulier :

- La décomposition des minéraux accessoires (carbonates, sulfates, sulfures, etc.) ;
- La combustion des matières organiques (carbone, acides humiques, ajouts hydrocarbonés, etc.) ;
- Le craquage de ces matières organiques ;
- Les réactions d'oxydo-réduction entre ces matières organiques et les oxydes de fer.

L'hypothèse du carbonate peut être rejetée car la température de dissociation est trop basse (moins de 950°C) et la destruction du HCl n'entrave pas l'expansion.

Les matières premières industrielles sans oxydes de fer ne se dilatent pas et ne libèrent pas de gaz lors de la combustion ou de la fissuration.

Les rôles des sulfates, sulfures et autres minéraux dans l'amélioration des taux d'expansion ne sont pas clairs, et il est difficile de séparer leurs effets en tant que vecteurs de fusion et sources de gaz.

Enfin, notons que toutes les argiles utilisées dans l'industrie contiennent à la fois des matières organiques (0,5~1%) et du fer dans une proportion significative (plus de 5% dans la plupart des cas). En l'absence de l'un de ces deux composants, l'expansion est nulle ou très faible et les praticiens semblent d'accord sur ce point. Ainsi, il est probable que la cause essentielle de l'expansion soit la réduction de l'oxyde de fer par la matière organique, mais l'apport de gaz avec d'autres causes ne peut pas être complètement éliminé. Bien entendu, ces considérations ne sont valables que pour les procédés industriels où la réaction de dissociation du minéral est suffisamment lente pour atteindre l'équilibre. Si la température augmente très rapidement, comme dans le cas de granulés isolés introduits dans un four de laboratoire préchauffé, certaines réactions chimiques n'ont pas le temps d'atteindre l'équilibre, il est ainsi possible d'obtenir en laboratoire une expansion impossible à reproduire au stade industriel.

La forme et la texture des granulats influencent la rhéologie et les propriétés du béton, les sphères régulières donnant les meilleurs résultats. Les particules anguleuses et rugueuses nécessitent plus d'eau et de ciment à l'état frais, mais peuvent offrir une meilleure adhérence.

[9]

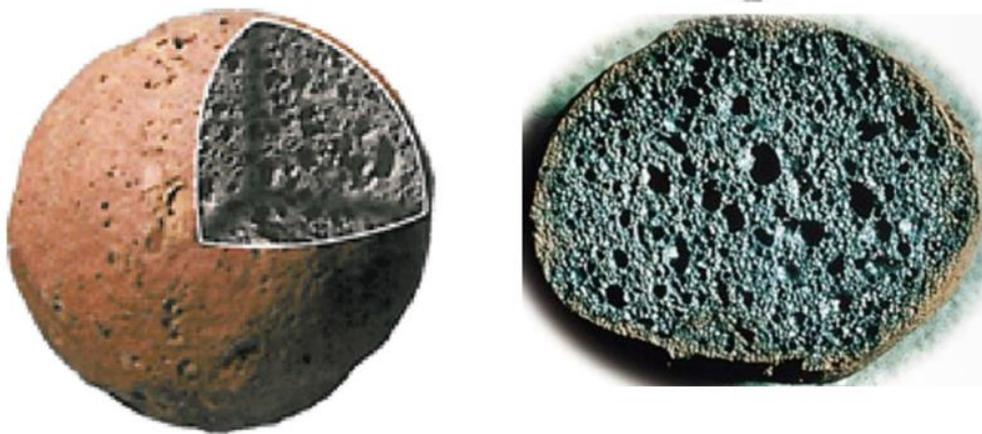


Figure II.7 : Trous interconnectés et cavités remplies d'air de différentes tailles [13]

## II.2.5. Propriétés du béton à base d'argile expansée

### II.2.5.1. La maniabilité

Youm et ses collaborateurs [14], ont comparé les propriétés de deux types de béton : un béton classique et un béton intégrant de l'argile expansée (granulats de 8 mm maximum). Le béton avec argile expansée présentait une meilleure maniabilité malgré un rapport eau/ciment plus faible. Cependant, son affaissement était légèrement plus important (augmentation de 4,5%).

Bogas et Nogueira [15], ont constaté une maniabilité plus élevée des mélanges de béton avec l'introduction de l'argile expansée (taille 4–12 mm) comme granulat grossier par rapport au mélange de béton de poids normal. L'affaissement moyen des mélanges de l'argile expansée était de 17,44 cm, alors qu'il était de 16,65 cm pour celui de poids normal.

Bogas et Gomes [16], ont étudié la fabrication de béton léger en utilisant de l'argile expansée (granulats de 12,5 mm maximum) avec une porosité de 60%. Ils ont varié le rapport E/C de 0,3 à 0,45. Les résultats ont montré que l'ajout d'argile expansée a amélioré la maniabilité du béton, augmentant son affaissement d'environ 27,55%.

### II.2.5.2. La densité

Des études ont montré que l'ajout de l'argile expansée dans le béton diminue sa densité. Cette diminution est d'autant plus importante que la quantité de l'argile expansée ajoutée est élevée. La densité du béton avec l'argile expansée peut varier selon la taille et le type de l'argile expansée utilisé.

Selon Baston et coll. [4], la densité des blocs de béton peut varier entre 1458 et 836 kg/m<sup>3</sup> en fonction de la proportion d'argile expansée utilisée comme granulats grossiers (entre 50% et 90%), et avec une quantité de ciment fixée à 155 kg/m<sup>3</sup>.

D'après Corinaldesi et Moriconi [17], le béton avec de l'argile expansée comme granulats fins et grossiers est 17,4% moins dense que le béton avec du sable comme granulats fins.

D'après Ali et Lazim [18], le béton avec l'argile expansée (granulats de 4 à 10 mm) comme gravier a une densité de 1 435 kg/m<sup>3</sup> après 28 jours. Cette densité augmente de 11,5%, 18,95% et 26,13% si l'on remplace une partie de l'argile expansée par du gravier classique, respectivement à 15%, 20% et 25% du volume total.

### **II.2.5.3. La résistance mécanique**

Nepomuceno et coll. [19] ont trouvé des valeurs de résistance à la compression comprises entre 35 et 57 MPa pour les bétons autoplaçant contenant de l'argile expansée comme granulats grossiers lorsque les rapports eau/c étaient compris entre 0,29 et 0,61, respectivement, tandis que les SCC contenant des granulats grossiers de poids normal présentaient des valeurs de résistance à la compression comprises entre 53 et 87 MPa, respectivement.

D'après Sharigh et al. [20], le béton avec 180 kg/m<sup>3</sup> d'argile expansée (granulats de 8 mm maximum) a une résistance à la compression de 30,8 MPa après 28 jours de séchage à l'air et de 26,6 MPa après 28 jours de cure humide.

D'après Ali et Lazim, [18] le béton avec des granulats légers en argile expansée (de 4 à 10 mm de diamètre) a une résistance à la compression de 17,9 MPa après 28 jours. Remplacer une partie de ces granulats par des granulats grossiers de poids ordinaires augmente cette résistance de 19 %, 29 % et 36 % pour des remplacements de 15 %, 20 % et 25 % du volume, respectivement.

### **II.2.5.4. L'isolation phonique et la conductivité thermique**

D'après Sousa et al. [21], les blocs de maçonnerie contenant de l'argile expansée (0,53 m<sup>3</sup> de sable classique, 0,14 m<sup>3</sup> d'argile expansée 2-4 mm et 0,73 m<sup>3</sup> d'argile expansée 3-8 mm) offrent une excellente isolation phonique et thermique. Leur conductivité thermique atteint 0,5 W/mK. Baston et al. [4], ont montré que la conductivité thermique des blocs de béton peut être réduite à 0,51, 0,44 et 0,33 W/mK en incorporant respectivement 65 %, 70 % et 80 % d'argile expansée comme granulats grossiers, avec une quantité de ciment de 214 kg/m<sup>3</sup>.

Hubertova et Hela [22], ont obtenu une conductivité thermique de 0,2429 W/mK pour un béton auto-plaçant (BAP) en remplaçant les granulats classiques par de l'argile expansée 1-4 mm et 4-8 mm.

## **II.3. Fibre de lin**

### **II.3.1. Généralités sur les fibres**

Les fibres agissent comme des micro-renforts et empêchent la propagation des fissures dans les pâtes de ciment hydratées. Elles contribuent également de manière significative à l'amélioration du comportement mécanique du béton après rupture. Le béton renforcé de fibres présente une meilleure résistance à la flexion et aux chocs sans pour autant remplacer le rôle de l'armature en acier dans le béton armé. L'ajout de fibres au béton a relativement peu d'effet sur la résistance à la compression et à la traction avant rupture. Cependant, l'introduction de fibres dans le béton provoque la rupture du squelette granulaire. Cette rupture s'accompagne d'une réduction de l'ouvrabilité proportionnelle à la teneur en fibres. Pour compenser ce phénomène, il est souvent nécessaire de limiter la taille maximale des gros granulats à 20 mm et d'augmenter la teneur en granulats fins (sable et pâte). De cette manière, le compactage et la maniabilité du mélange sont améliorés. Les fibres sont disponibles dans le commerce dans une variété de matériaux (acier, fonte, polypropylène, Kevlar, etc.) et de formes (droites, ondulées, façonnées et à double tête). La teneur en fibres est généralement comprise entre 0,35 % et 1,5 % en volume (Gagne, 1994). L'effet des fibres sur les propriétés du béton dépend donc largement de la quantité et du type de fibres utilisées. [23]

### **II.3.2. Les fibres végétales**

Fibres naturelles (ou d'origine naturelle), par opposition aux fibres d'origine chimique, y compris les fibres fabriquées à partir de produits naturels tels que la viscose, l'acétate et l'alginate (fibres artificielles d'origine végétale ou animale) et les fibres dérivées de produits chimiques tels que le polyamide, le polyester et le polyuréthane acrylique (fibres synthétiques), Dénommées comme telles.

La grande famille des fibres naturelles peut être subdivisée en trois sous familles :

- Les fibres d'origine animale (protéiques) qui se subdivise en :
  - ✓ Laine (mouton, chèvre, lapin, lama, vigogne) ;
  - ✓ Soie (ver à soie) ;
  - ✓ Poils (alpaga, cachemire, chameau, mohair) ;
- Les fibres d'origine minérale (silicatées) :
  - ✓ (Tourbe, verre, amiante, basalte, carbone, métaux) ;

- Les fibres d'origine végétale (cellulosiques) dont nous détaillerons les sources plus loin dans ce paragraphe.

Les fibres végétales sont des expansions cellulaires filamenteuses composées principalement de cellulose, d'hémicellulose, de lignine et de pectine. Elles se présentent sous deux formes : les fibres simples et les fibres associées à d'autres fibres. Les fibres simples correspondent à des cellules fibreuses rudimentaires et, associées à d'autres fibres, forment des faisceaux de fibres (Figure 5). Dans ce faisceau de fibres, les fibres sont liées entre elles principalement par la pectine et l'hémicellulose. [24]

Une caractéristique des fibres végétales est leur très grande longueur par rapport à leur diamètre. Cette finesse est généralement comprise entre 50 et 100 [25]

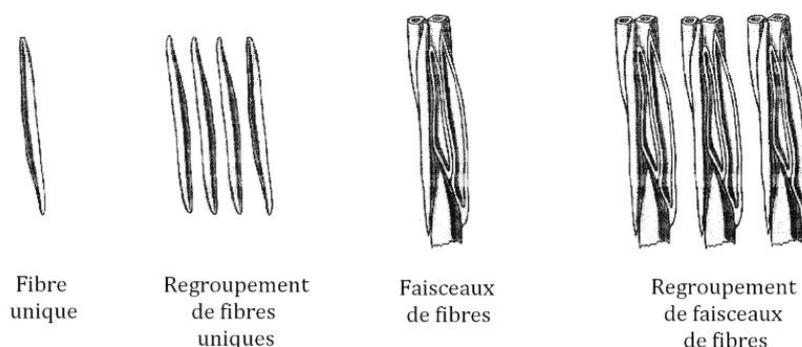


Figure II.8: Classification des fibres naturelles d'origines végétale et animale [26]

Les fibres végétales peuvent être issues de différentes parties de la plante. Elles peuvent provenir des graines (poils séminaux), de la tige ou du tronc (fibres libériennes), des fruits (enveloppe), ou bien encore des feuilles (Figure II.9).

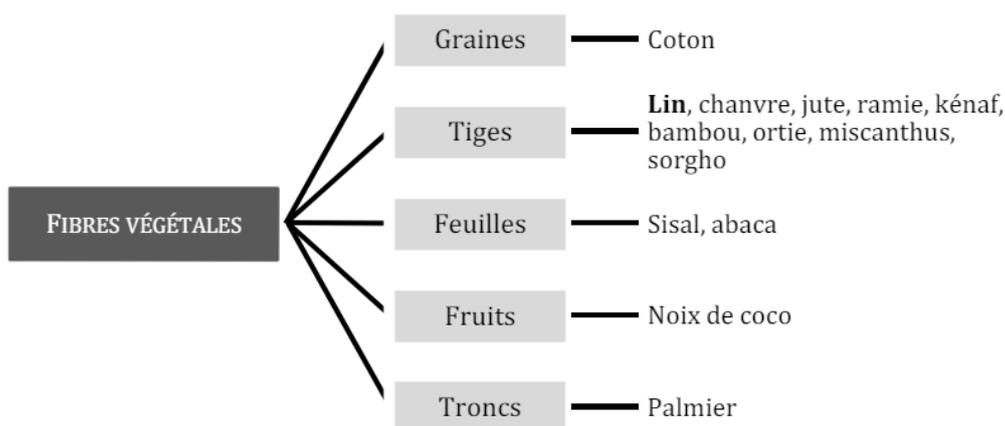


Figure II.9 : Classification des fibres végétales [27]

L'utilisation de fibres naturelles, en particulier de fibres végétales, comme renfort dans les matériaux composites présente un certain nombre d'avantages. Tout d'abord, l'utilisation de

fibres naturelles permet d'exploiter au mieux les ressources locales. En outre, elles sont souvent moins chères à obtenir que les fibres synthétiques ou artificielles. Deuxièmement, l'utilisation de ces fibres végétales dans les matériaux composites peut réduire l'impact sur l'environnement par rapport aux matériaux composites conventionnels. En effet, les fibres végétales sont des matières premières renouvelables, biodégradables, neutres en termes d'émissions de dioxyde de carbone et dont la production nécessite moins d'énergie. [28]

### II.3.3. Le lin : de la plante à la fibre

Le lin est une herbe annuelle que l'on trouve dans les régions tempérées et qui appartient à la famille des Linacées. Les tiges mesurent de 0,6 à 1,2 m de haut et de 1 à 3 mm de diamètre. La fibre de lin est récoltée à partir de la tige, et le terme "paille" désigne généralement l'ensemble de la tige. Cette tige est constituée de plusieurs bandes concentriques allant de l'extérieur vers l'intérieur (Figure II.10) :

- L'épiderme : membrane protectrice composée d'une seule couche de cellules
- Le parenchyme cortical (écorce extérieure) : système de respiration de la plante
- Phloème qui a un rôle de soutien de par les fibres libériennes
- Les faisceaux de fibres
- Le xylème est une zone de soutien formée de bois ; il permet la circulation de la sève brute (eau et de sels minéraux) puisée dans le sol par les racines.

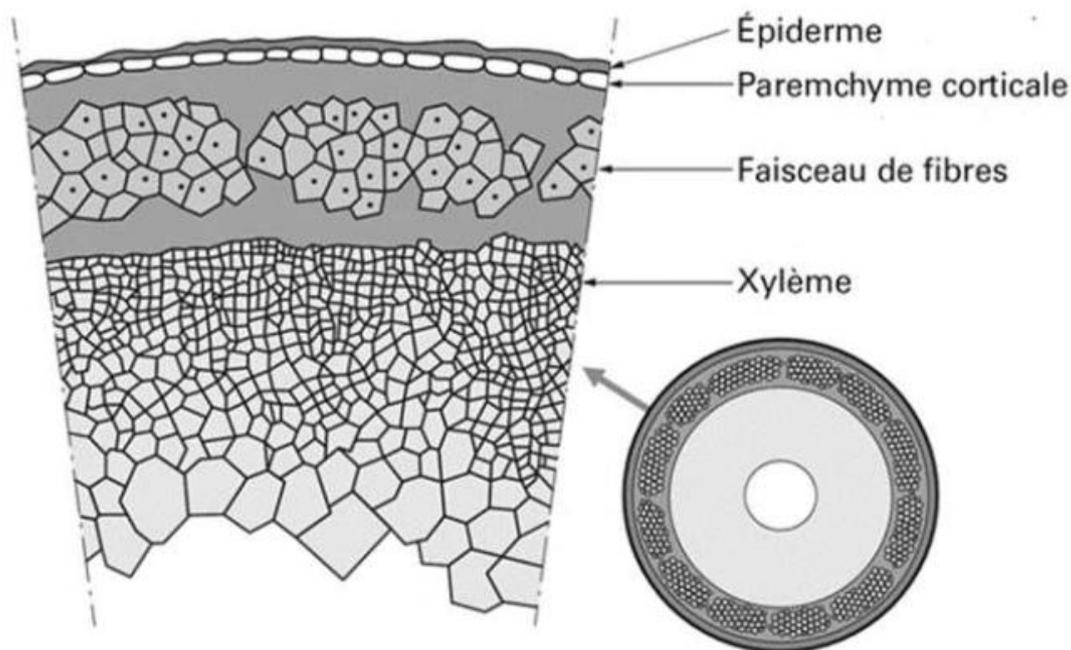


Figure II.10 : Représentation schématique de la section d'une tige de lin [29]

Les faisceaux de fibres se trouvent dans la tige de la feuille. Une coupe transversale d'une tige de lin montre 20 à 40 faisceaux. Chaque faisceau contient en moyenne 400 fibres. Les fibres de la tige sont donc petites, 10 à 80 mm de long et 10 à 30  $\mu\text{m}$  de diamètre, et sont responsables du soutien de la tige. La tige de lin a donc une structure de matériau composite. Cette structure permet au lin de résister aux contraintes de traction et de torsion, ce qui explique son excellente résistance à la verse. Les faisceaux de fibres sont répartis uniformément sur la périphérie de la tige, ce qui améliore son comportement en compression en réduisant le risque de Micro bouclage. En effet, lorsque des contraintes de flexion (dues par exemple au vent) sont appliquées, une section est tirée et l'autre comprimée. Les fibres sont très fortement liées entre elles et avec d'autres parties de la plante. Dans le cas du lin, ces liaisons sont principalement assurées par la pectine. Pour retirer les faisceaux de fibres de la tige, il faut d'abord rompre ces liaisons. Un traitement mécanique (grattage et peignage) permet ensuite de séparer les fibres. [30]

Le lin est une plante à croissance rapide qui nécessite des soins spécifiques. Il faut environ 100 jours pour qu'elle arrive à maturité.

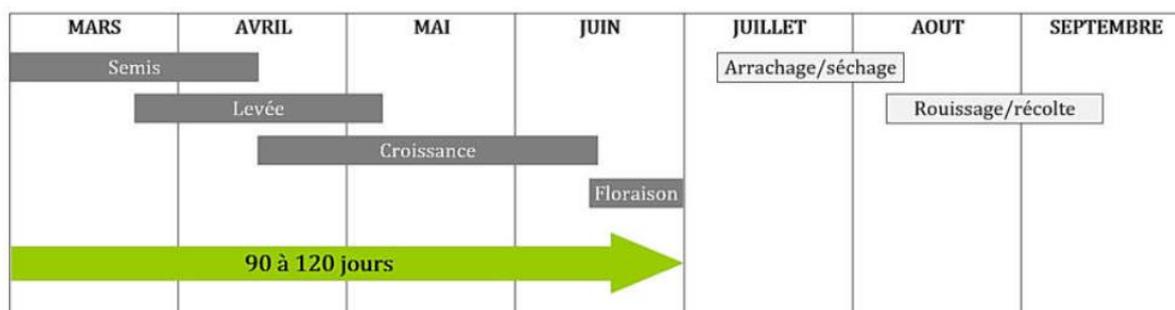


Figure II.11 : Etapes de la culture du lin de printemps [31]

La récolte du lin doit être effectuée lorsque les tiges sont d'un jaune verdâtre pour obtenir des fibres de haute qualité, car les récoltes précoces donnent des fibres plus fines et moins résistantes et les récoltes tardives des fibres plus fragiles et plus riches en étoupe. [32]

Le rouissage est une étape cruciale de la récolte du lin, qui consiste à décomposer les fibres végétales à l'aide de micro-organismes enzymatiques du sol afin de libérer les fibres des parties ligneuses. Ce processus peut durer de 2 semaines à 3 mois, en fonction du climat et des besoins de l'industrie. [33]

Après la récolte, les pailles de lin sont travaillées tout au long de l'année dans les usines de teillage. Cette première transformation de la paille a pour but d'extraire les fibres des tiges rouies. Plusieurs étapes successives jalonnent l'extraction des fibres de lin (Figure II.12).

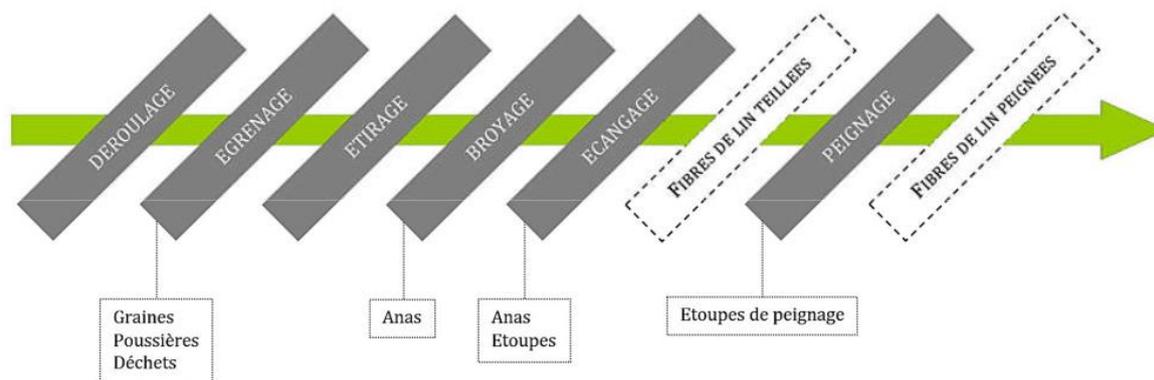


Figure II.12: Processus d'extraction des fibres de lin [31]

### II.3.4. Composition chimique

Les fibres végétales sont caractérisées par leur composition chimique, notamment par la répartition de leurs quatre composants principaux : la cellulose, l'hémicellulose, la lignine et la pectine. Ces composés ont une influence majeure sur les propriétés physiques des fibres végétales. La pectine et la lignine lient les microfibrilles et la matrice. La teneur en ces différents composés a également un effet significatif sur la durabilité des fibres végétales dans les matrices fortement alcalines [34]. La composition chimique de certaines fibres végétales est indiquée dans (le tableau II.8).

On peut noter la très grande variabilité des taux des différents constituants au sein d'un même type de fibre. On note toutefois la quantité importante de cellulose pour la fibre de lin, ce qui, avec le faible angle microfibrillaire, en fait une fibre dotée de bonnes caractéristiques mécaniques. Cette importante variabilité est due aux variations des conditions climatiques, à l'âge et aux différents traitements subis par les différentes fibres végétales [35]. De plus, l'espèce, la variété de la plante et la qualité du sol de culture sont aussi des paramètres influents sur la composition chimique des fibres. [36]

Tableau II.8 : Pourcentages massiques des constituants de différentes fibres végétales [37]

| Nature des fibres | Cellulose | Hémicelluloses | Lignine | Pectines | Cire  |
|-------------------|-----------|----------------|---------|----------|-------|
| Lin               | 64 – 85   | 5 – 20         | 0 – 5   | 2 – 20   | 1 – 2 |
| Chanvre           | 58 – 85   | 10 – 23        | 3 – 6   | 1 – 17   | 1     |
| Jute              | 61 – 75   | 11 – 15        | 8 – 15  | 0 – 1    | 1     |
| Sisal             | 66 – 70   | 12             | 10      | 1 – 2    | -     |
| Coco              | 32 – 43   | 10 – 31        | 20 – 49 | 3 – 4    | -     |

### II.3.5. Propriétés hygroscopiques

Contrairement aux fibres de verre, les fibres végétales retiennent l'eau entre les microfibrilles grâce à la présence d'hémicellulose. Cette propriété hydrophile est une propriété importante à prendre en compte pour les fibres végétales. Le comportement des fibres de lin vis-à-vis de l'eau peut influencer le comportement des composites cimentaires, tant à l'état frais qu'à l'état durci. (Tableau II.9) résume le coefficient d'absorption d'eau des fibres végétales les plus couramment utilisées comme renfort dans les composites.

**Tableau II.9 : Coefficient d'absorption d'eau de différentes fibres végétales**

| Nature des fibres | Absorption (%) | Références |
|-------------------|----------------|------------|
| Lin               | 136 ± 25 %     | [37]       |
|                   | 152 ± 7 %      | [38]       |
| Chanvre           | 158 ± 30 %     | [37]       |
| Jute              | 281 %          | [39]       |
| Sisal             | 201 %          | [40]       |
|                   | 200 %          | [39]       |
|                   | 230 ± 16 %     | [41]       |
| Coco              | 146 %          | [40]       |
|                   | 100 ± 19,5 %   | [41]       |
|                   | 180 %          | [39]       |

Il est à noter que les valeurs présentées dans le tableau ci-dessus sont issues de différentes études visant à déterminer l'absorption d'eau des fibres végétales après 24 heures d'immersion.

Tout d'abord, il convient de noter que l'absorption d'eau des fibres végétales est très élevée. La plupart des fibres peuvent absorber plus d'eau que leur propre masse. Il est également intéressant d'observer la cinétique d'absorption de l'eau ; Magniont a réalisé des tests pour suivre la cinétique d'absorption de l'eau des fibres de lin et de chanvre [37] (Figure II.13). Les résultats ont montré que les fibres végétales se saturent très rapidement, en moins de 30 minutes.

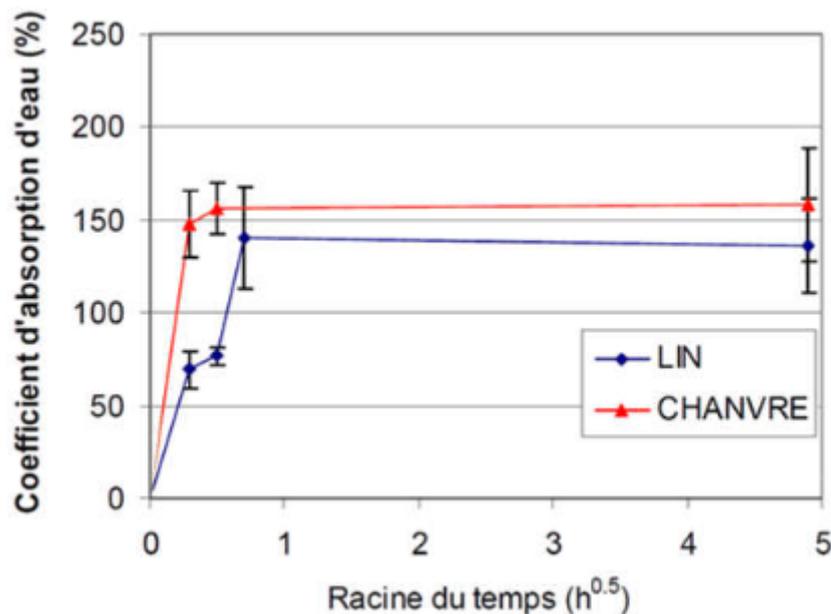


Figure II.13: Cinétique d'absorption d'eau des fibres de lin et de chanvre [37]

### II.3.6. Propriétés mécaniques

Les essais de traction sur les fibres de lin sont difficiles à réaliser en raison des dimensions réduites des fibres. En général, ces essais nécessitent une cellule de force de faible capacité et des mâchoires adaptées. La courbe charge-déplacement obtenue lorsqu'une fibre de lin est soumise à un effort de traction présente deux parties linéaires séparées par une zone non linéaire (Figure II.14). La première partie linéaire de la courbe correspond à la charge globale de la fibre. La partie suivante est interprétée comme la déformation viscoélastique de la fibre et correspond au réarrangement de la partie amorphe dans la paroi cellulaire et à l'alignement progressif des microfibrilles sur l'axe de traction. Enfin, la dernière partie linéaire correspond à la déformation élastique de la fibre, avec une nouvelle organisation des fibrilles. [42]

Au travers d'essais de traction cyclique charge-décharge, Baley a noté une augmentation progressive du module d'Young avec le nombre de cycles [36]. Il explique cette augmentation par la réorientation progressive des microfibrilles de cellulose par rapport à l'axe de contrainte. Initialement, dans les parois S2 de plus grandes dimensions, l'angle des microfibrilles était d'environ 10°.

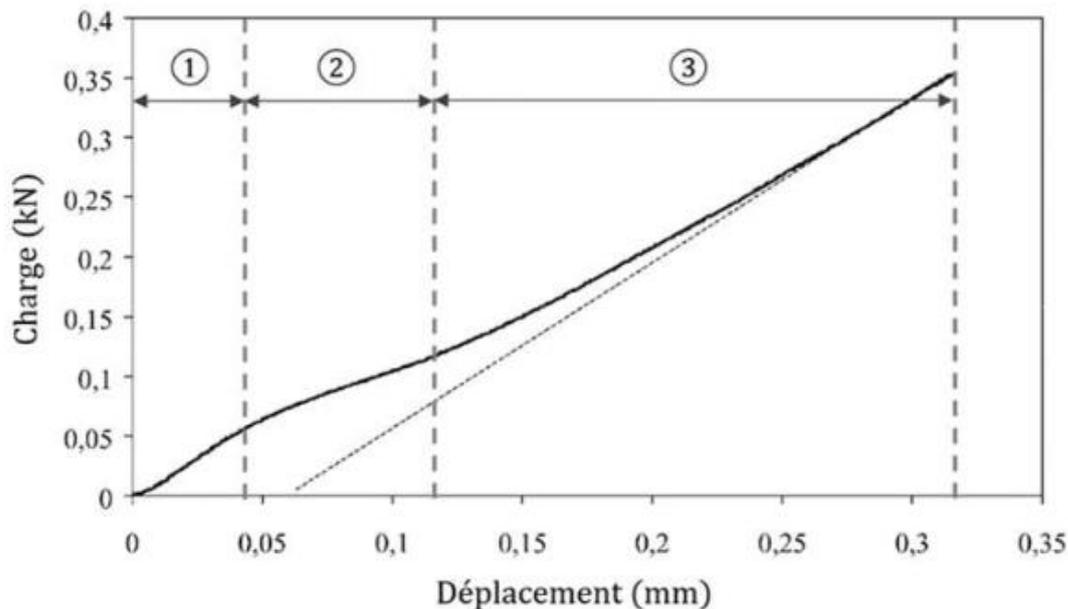


Figure II.14: Comportement en traction d'une fibre de lin [36]

Les fibres de lin ont de très bonnes propriétés mécaniques par rapport aux autres fibres naturelles et sont classées au premier rang. Elles sont également classées après la fibre de carbone par rapport aux fibres conventionnelles. La dureté de la fibre dépend de l'âge du linier, des conditions climatiques et géologiques. Les propriétés de la fibre de lin sont les suivantes :

- ✓ Faible densité ( $1,5 \text{ g/cm}^3$  vs  $2,54 \text{ g/cm}^3$  de fibre de verre) ;
- ✓ Rigidité spécifique plus grande que la fibre de verre ;
- ✓ L'absorption de vibration plus grande que les fibres de verre et de carbone ;
- ✓ L'isolation thermique et acoustique plus élevée que celle des fibres de verre et de carbone ;
- ✓ Moins impacts sur l'environnement que les fibres de verre et de carbone (Figure II.15) :

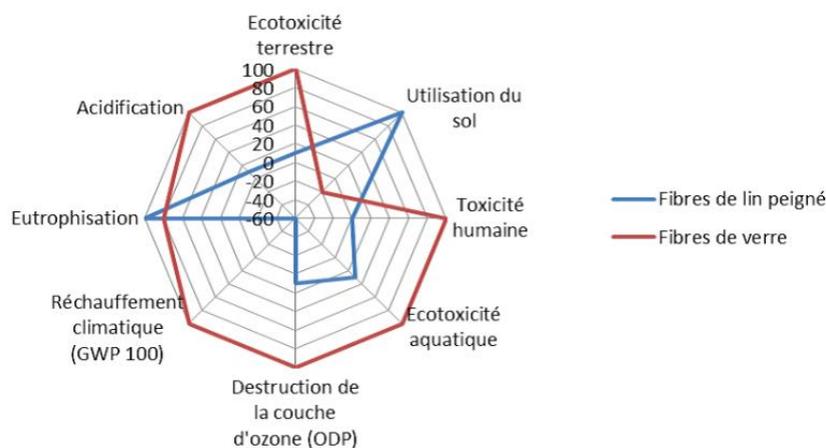


Figure II.15: Impacts environnementaux de la production de fibre de Lin peigné comparés à la fibre de verre [43]

### **II.3.7. Etude des propriétés mécaniques d'un béton renforcé par des fibres de lin**

Les résultats de cette testés sont résumés dans ces points :

- L'absorption d'eau des fibres de lin est très importante : près de 80 % d'absorption d'eau massique en moins d'une minute. De plus, l'absorption d'eau des fibres suit une loi logarithmique, avec une première phase d'absorption rapide dans les premières minutes d'immersion, puis une lente diffusion de l'eau dans la structure végétale.
- La maniabilité est fortement influencée par l'ajout de fibres de lin. Plus la longueur et le taux de fibres augmente, plus la maniabilité du béton diminue. L'absorption d'eau des fibres de lin est en partie responsable de cette perte de maniabilité.
- L'air occlus des bétons fibrés est toujours plus important que le béton témoin non fibré. De plus, la teneur en air semble augmenter lorsque la longueur des fibres diminue.
- La résistance en compression du béton est dans la plupart des cas plus ou moins altérée ; ceci est probablement lié à l'augmentation de la porosité des bétons (air occlus).
- La résistance en flexion est améliorée pour les bétons renforcés de fibres de lin de 12 et 24 mm de longueur. De plus, on observe pour chaque longueur de fibres une augmentation de la résistance en flexion lorsque le taux de fibres incorporées dans le béton augmente.

Au vu des résultats obtenus, une longueur de 12 mm semble offrir le meilleur compromis entre deux paramètres importants : la résistance à la flexion et la maniabilité. En effet, les fibres de 12 mm ont permis d'augmenter la résistance à la flexion de plus de 20%. De plus, l'utilisation de fibres de cette longueur réduit la détérioration de l'ouvrabilité du béton. [44]

## **II.4. Conclusion**

Cette revue de la littérature a permis d'établir un cadre solide pour notre étude sur les bétons légers incorporant de l'argile expansée et des fibres de lin. L'exploration des propriétés et applications des bétons légers a mis en évidence leur potentiel considérable dans la construction durable, notamment en termes d'allègement des structures et d'amélioration de l'isolation thermique.

L'examen approfondi des caractéristiques de l'argile expansée a révélé ses atouts majeurs pour la production de bétons légers, en particulier sa faible densité et ses propriétés isolantes. Parallèlement, l'étude des fibres de lin a souligné leur intérêt comme renfort naturel, susceptible d'améliorer certaines propriétés mécaniques du béton.

Sur la base de ces informations, nous avons choisi d'explorer des formulations incorporant 30%, 60%, et 100% d'argile expansée, combinées à 0,15% et 0,3% de fibres de lin. Ces proportions ont été sélectionnées pour évaluer de manière systématique l'impact de cette combinaison sur les caractéristiques mécaniques, physiques et thermiques du béton.

Cette approche nous permettra d'analyser les synergies potentielles entre l'argile expansée et les fibres de lin, tout en cherchant un équilibre optimal entre légèreté, résistance mécanique et performance thermique. Les résultats de cette étude devraient contribuer à l'avancement des connaissances sur les bétons légers renforcés de fibres naturelles et ouvrir de nouvelles perspectives pour leur application dans la construction durable.

### III. Chapitre

## Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essai

### III.1. Introduction

La composition d'un béton léger influence grandement ses propriétés et son comportement futur. Pour garantir la cohérence des résultats et la comparabilité avec les données expérimentales publiées, il est crucial de normaliser les méthodes d'évaluation et d'identification de la composition des bétons légers, conformément aux normes en vigueur.

Ce chapitre présente les différents matériaux utilisés dans la fabrication des bétons légers étudiés, ainsi que les essais réalisés selon les normes et pratiques en vigueur. L'ensemble des matériaux employés proviennent de sources locales et leurs propriétés ont été testées expérimentalement au Laboratoire de Génie Civil de l'Université EL BACHIR EL IBRAHIMI à Bordj Bou Arreridj.

### III.2. Granulats

#### III.2.1. Sable

Dans notre étude expérimentale, deux types de sable ont été utilisés : un sable de carrière et un sable de rivière. Les caractéristiques suivantes ont été déterminées pour les caractériser : l'analyse granulométrique par tamisage, la masse volumique apparente, la masse volumique absolue et l'équivalent de sable.

##### III.2.1.1. L'équivalent de sable

L'équivalent de sable est un paramètre qui permet d'évaluer la propreté d'un sable. Il renseigne sur la teneur en éléments fins indésirables tels que les argiles, les matières végétales ou organiques présents à la surface des grains. Les valeurs de l'équivalent de sable sont présentées dans les tableau II.10 et II.11, conformément à la norme NF EN 933-8+A1 (2015).

**Tableau III.10 : Equivalent de sable de carrière ( EN 933-8)**

| <b>Equivalent de sable (EN 933-8) de carrière</b> |       |                     |                     |                      |         |         |             |             |
|---|-------|---------------------|---------------------|----------------------|---------|---------|-------------|-------------|
| Essai   | M (g) | h <sub>1</sub> (cm) | h <sub>2</sub> (cm) | h' <sub>2</sub> (cm) | ESV (%) | ESP (%) | Moy<br>ESV% | Moy<br>ESP% |
| <b>1</b>  | 120   | 11,6                | 8,3                 | 7,6                  | 66%     | 72%     | <b>67%</b>  | <b>74%</b>  |
| <b>2</b>  | 120   | 10,7                | 8,2                 | 7,3                  | 68%     | 77%     |             |             |

**Tableau III.11 : Equivalent du sable de rivière (EN 933-8)**

| <b>Equivalent de sable (EN 933-8) de rivière</b> |       |                     |                     |                      |         |         |             |             |
|--|-------|---------------------|---------------------|----------------------|---------|---------|-------------|-------------|
| Essai  | M (g) | h <sub>1</sub> (cm) | h <sub>2</sub> (cm) | h' <sub>2</sub> (cm) | ESV (%) | ESP (%) | Moy<br>ESV% | Moy<br>ESP% |
| <b>1</b>   | 120   | 11,7                | 9,2                 | 9                    | 77%     | 79%     | <b>78%</b>  | <b>81%</b>  |
| <b>2</b>   | 120   | 11,2                | 9,4                 | 8,8                  | 79%     | 84%     |             |             |

D'après les résultats consignés dans les tableaux 1 et 2, on constate que les sables utilisés dans cette étude expérimentale sont très propres et de granulométrie fine, avec de faibles teneurs en éléments polluants fins.

### III.2.1.2. L'analyse granulométrique par tamisage

L'analyse granulométrique consiste à mesurer la distribution des tailles des grains (granulométrie) d'un matériau granulaire. Cette analyse s'effectue en utilisant un ensemble de tamis superposés, dont les ouvertures diminuent de taille du haut vers le bas. Chaque tamis retient les grains dont la dimension est supérieure à l'ouverture du tamis. En pesant la quantité de matériau retenue sur chaque tamis, on obtient la répartition granulométrique du matériau analysé.

La figure III.16 présente les courbes granulométriques du sable de carrière et du sable de rivière.

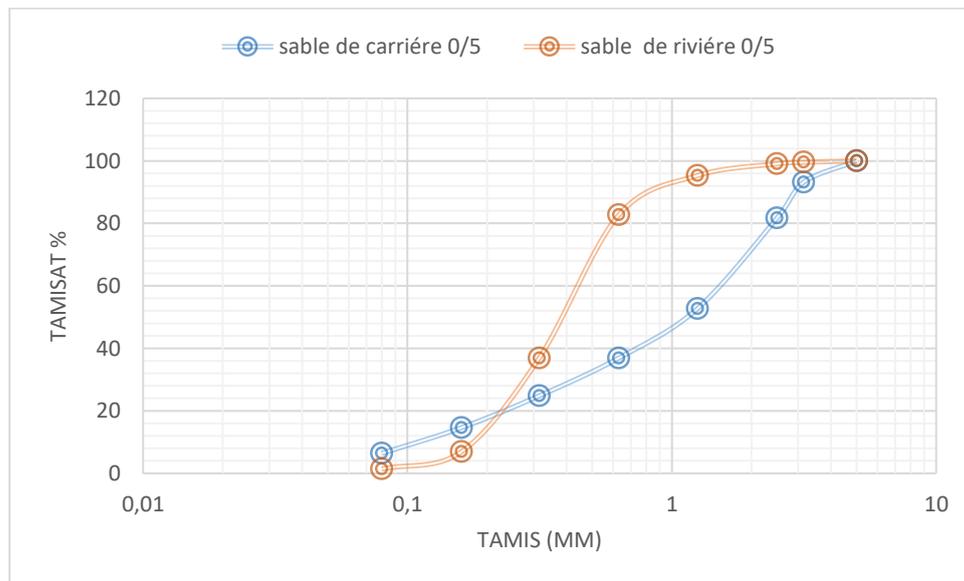


Figure III.16 : Courbes granulométriques de sable de carrière et sable de rivière.

Les deux courbes granulométriques montrent que les deux types de sable sont bien gradués, avec une distribution relativement uniforme des grains sur l'ensemble des classes granulométriques. La majorité des grains dans les deux échantillons ont une taille comprise entre 0,2 mm et 1 mm. Les courbes présentent une légère décroissance vers les plus petites tailles de grains, ce qui indique une faible présence de fines.

### III.2.2. Argile expansée

Les propriétés des granulats légers de l'argile expansée jouent un rôle primordial dans les performances des bétons dans lesquels ils sont incorporés. Afin d'optimiser la formulation et le comportement de ces bétons, il est essentiel de caractériser rigoureusement les granulats d'argile expansée utilisés, Cette caractérisation complète passe par l'évaluation de plusieurs paramètres clés tel que la porosité, l'absorption, l'analyse granulométrique et la composition chimique, la masse volumique apparente et absolue, Les résultats de cette caractérisation de l'argile expansée permettront une meilleure compréhension et une formulation optimisée des bétons légers à hautes performances incorporant ce type de granulats.



Figure III.17 : Granulat d'argile expansée 3/8 mm et 8/15.

#### III.2.2.1. La porosité et l'absorption

Lors de la formulation des bétons, il est essentiel de connaître précisément la porosité et l'absorption de granulat utilisé afin d'ajuster la composition de manière adéquate.

La porosité :

Tableau III.12 : La porosité d'argile expansée

| Type d'argile expansé<br>(mm) | $M_{sèche}$<br>(g) | $M_{humide}$<br>(g) | $V_t$<br>(L) | $V_v$<br>(L) | $P$<br>(%) |
|-------------------------------|--------------------|---------------------|--------------|--------------|------------|
| 3/8                           | 100                | 108                 | 0,111        | 0,008        | 7,2        |
| 8/15                          | 100                | 109                 | 0,111        | 0,009        | 8,1        |

$$P = \frac{V_v}{V_t} \times 100$$

$M_{sèche}$  : La masse d'argile expansé sèche

$M_{humide}$  : La masse d'argile expansé humide après 24 heure

$V_t$ : Volume total

$V_v$  : Volume de vide

$P$  : La porosité

**Absorption par immersion totale :**

**Tableau III.13 : L'absorption par immersion totale d'argile expansée**

| Type de granula | $M_{sèche}(g)$ | $M_{humide}$<br>(g) | C (%)      |
|-----------------|----------------|---------------------|------------|
| <b>3/8</b>      | 100            | 108                 | <b>8 %</b> |
| <b>8/15</b>     | <b>100</b>     | <b>109</b>          | <b>9 %</b> |

$$C = \frac{M_{humide} - M_{sèche}}{M_{sèche}} * 100$$

$M_{sèche}$  : La masse d'argile expansé sèche

$M_{humide}$  : La masse d'argile expansé humide après 24 heure

$C$  : L'absorption par immersion totale

La porosité et l'absorption d'eau, intimement liées à la structure interne poreuse et alvéolaire de ces granulats légers, influencent directement les propriétés d'ouvrabilité, la masse volumique et les résistances mécaniques du béton. Les granulats légers se distinguent par une porosité totale élevée, est nettement supérieure à celle des granulats minéraux classiques.

**III.2.2.2. L'analyse granulométrique de l'argile expansé**

La caractérisation granulométrique précise de l'argile expansée est essentielle pour formuler un béton léger aux propriétés à l'état frais et durci optimisées, en termes de maniabilité, compacité, résistances mécaniques et performances d'isolation. Les résultats de cette analyse pour l'argile expansée utilisée dans cette étude sont présentés sur la figure suivante :

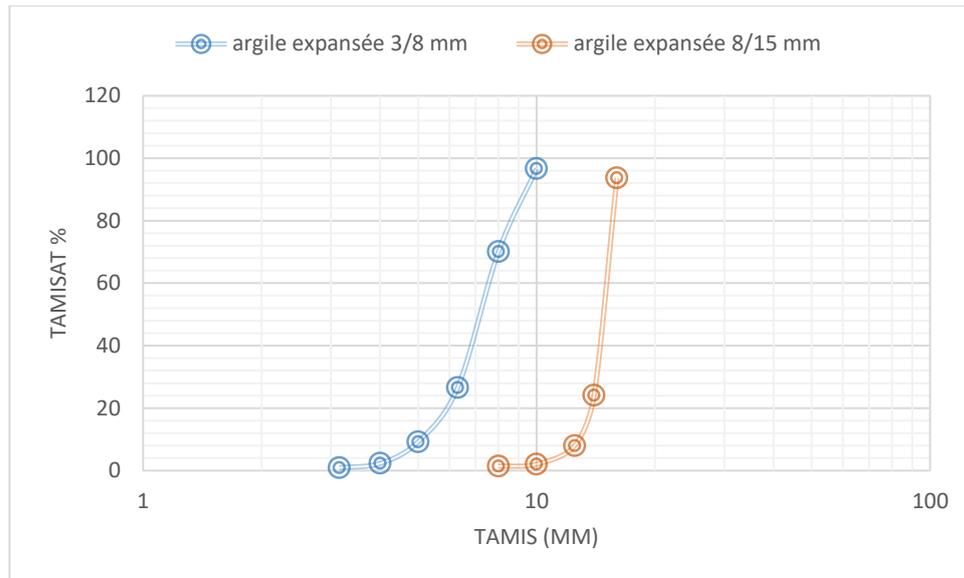


Figure III.18: Courbe granulométrique de l'argile expansée 3/8, 8/15

D'après les courbes granulométriques présentées sur ce graphique, on peut faire les observations suivantes sur les différentes argiles expansées utilisés :

Argile expansée 8/15 : Cette argile expansée possède une granulométrie plutôt grossière, avec une majorité de grains compris entre 4 mm et 15 mm environ. Sa courbe montre un pourcentage passant très faible (proche de 0%) pour les petits tamis jusqu'à 2-3 mm, puis une augmentation rapide au-delà, atteignant 100% aux alentours de 15 mm.

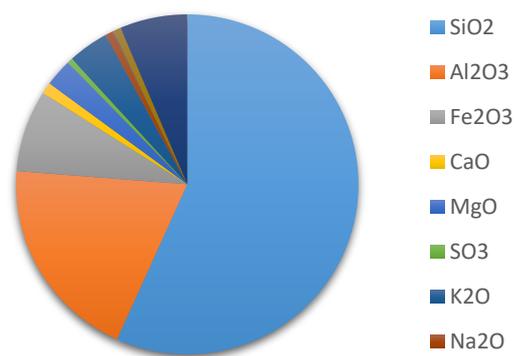
Argile expansée 3/8 : Cette argile a une granulométrie plus fine que la précédente, avec la majorité des grains compris entre 1 mm et 8 mm. Sa courbe présente une augmentation progressive sur une large plage de tailles de tamis, entre 0,1 mm et 8 mm.

### III.2.2.3. La composition chimique et la masse volumique

La composition chimique exacte conditionne donc la microstructure finale et les propriétés de l'argile expansée comme sa porosité, sa légèreté, sa stabilité chimique ou encore sa durabilité. Une connaissance approfondie de cette composition permet d'optimiser le procédé de fabrication et d'anticiper le comportement du granulat dans les bétons. Elle est présentée sur la figure suivante :

**Tableau III.14: Analyse chimique de l'argile schisteuse de BOUINAN ( ALGEXPAN - ALGERIE ) [45]**

|              |              |              |
|--------------|--------------|--------------|
| <b>SiO2</b>  | <b>56,68</b> | <b>58,37</b> |
| <b>Al2O3</b> | 19,49        | 18,18        |
| <b>Fe2O3</b> | 7,77         | 7,53         |
| <b>CaO</b>   | 1,09         | 0,93         |
| <b>MgO</b>   | 2,59         | 2,86         |
| <b>SO3</b>   | 0,53         | 0,71         |
| <b>K2O</b>   | 3,85         | 3,51         |
| <b>Na2O</b>  | 0,71         | 0,93         |
| <b>P2O5</b>  | 0,1          | 0,09         |
| <b>TiO2</b>  | 0,73         | 0,72         |
| <b>PF</b>    | 6,36         | 6,18         |



La masse volumique est une propriété fondamentale de la matière qui permet de caractériser la densité d'un matériau. Elle est présentée sur la figure suivante :

**Tableau III.15 : La masse volumique d'argiles expansée [45]**

| <b>AN 8/15 - 500</b>                     | <b>Val. Déclarée</b> |            |
|--|----------------------|------------|
| <b>Essais</b>                            | DE500-600            | Norme      |
| <b>Forme de granulat</b>                 | NODULAIRE            | EN 13055-1 |
| <b>Résistance à l'écrasement en vrac</b> | 4,25                 | EN 13055-1 |
| <b>Masse volumique en vrac</b>           | 528 Kg/m3            | EN 1097-3  |
| <b>Masse volumique réelle</b>            | 900 Kg/m3            | EN 1097-6  |

### III.2.3. Gravier

Dans cette étude, un soin particulier a été apporté à la préparation et l'analyse du gravier utilisé en tant que gros granulat ou on a utilisé deux fractions de gravier 3/8 et 8/15. Dans un premier temps, le gravier brut a subi un lavage minutieux afin d'éliminer toutes les impuretés, ce processus de lavage permet d'obtenir un gravier parfaitement propre et débarrassé des éléments polluants. Après cette étape de lavage, le gravier a été soigneusement séché afin d'extraire la totalité de l'humidité résiduelle. Un gravier parfaitement sec est en effet indispensable pour assurer un dosage précis des différents constituants du béton et éviter toute variation de la teneur en eau du mélange.

Une fois lavé et séché, une analyse granulométrique complète du gravier a été réalisée par tamisage, les résultats de cette analyse sont présentés sur la figure suivante :

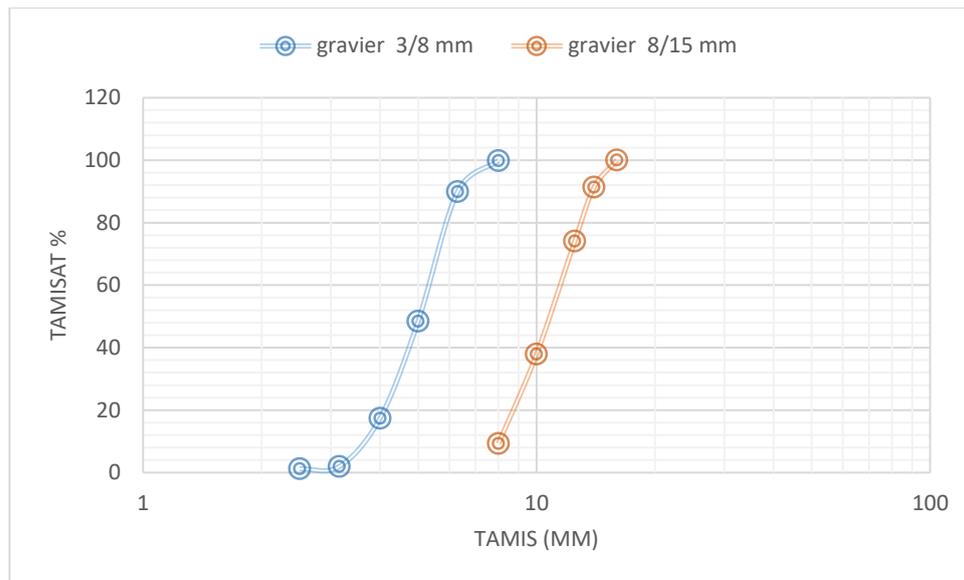


Figure III.19 : Courbe granulométrique de gravier 3/8 et 8/15

Les analyses granulométriques révèlent une bonne gradation pour les deux types de gravier, avec une répartition homogène des grains sur l'ensemble des classes granulométriques.

Le gravier 3/8 mm se caractérise par une majorité de grains (environ 85%) compris entre 2 et 8 mm, tandis que le gravier 8/15 mm présente une concentration de grains (environ 80%) entre 4 et 16 mm.

### III.3. Ciment

Le liant choisi pour cette étude est le ciment CEM I 42.5R de la marque Al-Baskariya. Ce ciment de type Portland est spécifiquement conçu pour les bétons hautes performances et offre une résistance rapide à court terme. Il est conforme à la norme algérienne NA442-2013.



Figure III.20 : Le ciment Portland Al-Baskariya CEM I 42.5R

### III.3.1. Les propriétés de ciment

À partir de la fiche technique de ciment on a :

**Tableau III.16 : Propriétés de ciment Portland Al-Baskariya CEM I 42.5R [46]**

| Propriétés physiques        | Valeur      |
|-----------------------------|-------------|
| Consistance normale (%)     | 25.8 – 26.4 |
| Expansion à chaud (mm)      | 0.25 – 1.0  |
| Temps de prise (min)        | Valeur      |
| Début de prise              | 150 – 190   |
| Fin de prise                | 220 - 250   |
| Résistance à la compression | Valeur      |
| 2 jours (MPa)               | 20 – 29     |
| 28 jours (MPa)              | 42.5 – 52.5 |

### III.4. Fibre de lin

Pour renforcer le béton, nous avons opté pour la fibre de lin non traitée, coupée à 3 cm maximum. Ce choix s'explique par les propriétés intrinsèques de la fibre de lin, comme sa résistance à la traction et sa flexibilité, idéales pour renforcer le béton.



Figure III.22 : fibre de lin

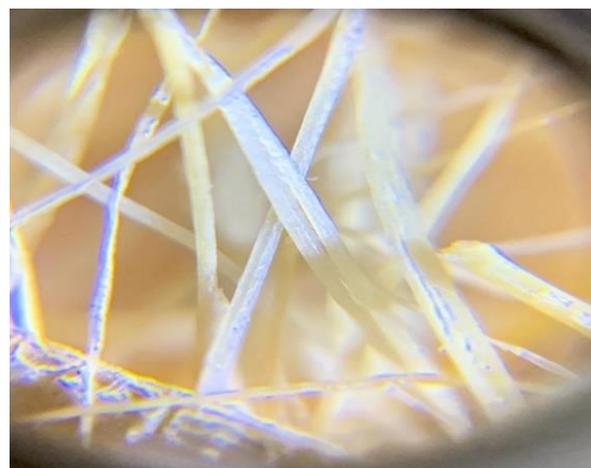


Figure III.21 : Vue rapprochée des fibres de lin

Les propriétés des fibres de lin sont regroupées dans le tableau :

**Tableau III.17 : Propriétés des fibres de lin [47]**

| Densité<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Résistance ultime à la traction<br>(MPa) | Module de traction<br>(GPa) | Allongement<br>(%) |
|---------------------------------|--|-----------------------------|--------------------|
| 1,5                             | 500 - 1500                               | 28 - 80                     | 1,8 – 3,2          |

### III.5. Proportion de mélange

L'étude s'est basée sur la méthode Dreux-Gorisse, pour élaborer 12 mélanges de béton distincts. Un mélange témoin à base de gravier a été défini, tandis que les 11 autres mélanges ont été obtenus en substituant partiellement le gravier par des granulats d'argile expansée selon trois taux de remplacement (30 %, 60 % et 100 % en volume). Cinq tailles de granulats ont été utilisées pour chaque type de granulats : sable 0/4, gravier 3/8 et 8/15, argile expansée 3/8 et 8/15. La teneur en fibres de lin a été fixée à 0% ; 0,15 % ou 0,3 % pour tous les mélanges, en maintenant un rapport E/C= 0,46 constant. Les détails précis de chaque mélange sont présentés dans le tableau III.18 :

**Tableau III.18 : Les formulation des bétons**

| Argile<br>expansé<br>(%) | Fibre<br>de<br>lin<br>(%) | Ciment<br>(Kg) | Sable R<br>0/4<br>(Kg) | Sable<br>C 0/4<br>(Kg) | Argile<br>3/8<br>(Kg) | Gravier<br>3/8<br>(Kg) | Argile<br>8/15<br>(Kg) | Gravier<br>8/15<br>(Kg) | SP<br>(Kg) | Eau<br>(Kg) | Fibre<br>lin<br>(Kg) |
|--------------------------|---------------------------|----------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------|-------------|----------------------|
| 0                        | 0                         | 400            | 163                    | 655                    | 0                     | 307                    | 0                      | 550                     | 7          | 187         | 0                    |
| 0                        | 0,15                      | 400            | 163                    | 655                    | 0                     | 307                    | 0                      | 550                     | 7          | 187         | 1.92                 |
| 0                        | 0,3                       | 400            | 163                    | 655                    | 0                     | 307                    | 0                      | 550                     | 7          | 187         | 3.9                  |
| 30                       | 0                         | 400            | 163                    | 655                    | 38                    | 269                    | 62                     | 487                     | 7          | 187         | 0                    |
| 30                       | 0,15                      | 400            | 163                    | 655                    | 38                    | 269                    | 62                     | 487                     | 7          | 187         | 1.92                 |
| 30                       | 0,3                       | 400            | 163                    | 655                    | 38                    | 269                    | 62                     | 487                     | 7          | 187         | 3.9                  |
| 60                       | 0                         | 400            | 163                    | 655                    | 78                    | 230                    | 125                    | 425                     | 7          | 187         | 0                    |
| 60                       | 0,15                      | 400            | 163                    | 655                    | 78                    | 230                    | 125                    | 425                     | 7          | 187         | 1.92                 |
| 60                       | 0,3                       | 400            | 163                    | 655                    | 78                    | 230                    | 125                    | 425                     | 7          | 187         | 3.9                  |
| 100                      | 0                         | 400            | 163                    | 655                    | 130                   | 0                      | 207.48                 | 0                       | 7          | 187         | 0                    |
| 100                      | 0,15                      | 400            | 163                    | 655                    | 130                   | 0                      | 207.48                 | 0                       | 7          | 187         | 1.92                 |
| 100                      | 0,3                       | 400            | 163                    | 655                    | 130                   | 0                      | 207.48                 | 0                       | 7          | 187         | 3.9                  |

## III.6. Malaxage et mise en œuvre des éprouvettes

### III.6.1. Malaxage du béton léger

On fait le malaxage de chaque gâchée de béton léger mécaniquement au moyen du malaxeur

- Peser avec précision les quantités requises de chaque constituant selon la formulation



Figure III.23 : Quantités de matériaux utilisés

- Dans un récipient séparé, mélanger l'eau et le super plastifiant.
- Introduire dans le malaxeur les granulats (argile expansée fractions 3/8 et 8/15, gravier fractions 3/8 et 8/15, sables de carrière et de rivière) chaque mélange selon sa formulation.



Figure III.24 : Malaxage des granulats à sec

- Mélanger à sec pendant 1 à 2 minutes pour homogénéiser le mélange de granulats.

- Ajouter le ciment au mélange de granulats.
- Mélanger pendant 2 à 3 minutes supplémentaires pour assurer une bonne répartition du ciment.
- Incorporer progressivement les fibres de lin pendant le malaxage.



Figure III.25 : Quantité de fibre de lin

- Verser lentement le mélange eau/super plastifiant dans le malaxeur tout en malaxant.



Figure III.26 : Verser le mélange eau/super plastifiant

- Malaxer pendant 3 à 5 minutes supplémentaires pour obtenir un mélange homogène.



Figure III.27 : Malaxage de mélange

- Vérifier la maniabilité de béton avec l'essai d'affaissement.



Figure III.28 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams

- Couler immédiatement le béton léger dans les moules.

### III.6.2. Mise en œuvre des éprouvettes

- Les éprouvettes sont de forme cubiques (100 mm × 100 mm × 100 mm) et de forme rectangulaire (70 mm × 70 mm × 280 mm).
- Les moules doivent être huilés avant le coulage.



Figure III.29 : Les moules après coulage du béton

- Le démoulage doit être après 24 heures depuis le coulage.

### III.6.3. Conservation

Après 24h de prise, les éprouvettes de béton léger ont été démoulées soigneusement. Elles ont ensuite été enveloppées individuellement dans du film plastique étanche pour permettre une cure endogène. À 28 et 90 jours, des échantillons ont été prélevés pour caractériser les propriétés mécaniques (résistance à la compression, flexion, etc.) et physiques (masse volumique, porosité, etc.) du béton durci. Cette méthode de conservation garantit des conditions de maturation représentatives.



Figure III.30 : la conservation des éprouvettes

### III.7. Conclusion

Dans cette étude, une caractérisation complète des matériaux constitutifs des bétons légers a été réalisée selon les normes en vigueur. Les propriétés de l'argile expansée, des granulats, des liants et des fibres de lin ont été déterminées expérimentalement au Laboratoire de Génie Civil. Les procédures de malaxage et de mise en œuvre ont été soigneusement décrites, en suivant des méthodes normalisées pour assurer la comparabilité des résultats. Le processus d'incorporation des différents composants a été détaillé pour obtenir un mélange homogène.

Cette approche rigoureuse, combinant la caractérisation des matériaux et la standardisation des procédés, a permis d'évaluer de manière fiable les propriétés et le comportement des bétons légers renforcés de fibres de lin. Les résultats obtenus contribueront à une meilleure compréhension de ces matériaux innovants pour la construction durable

**IV.Chapitre :**  
**Résultat et discussion**

## IV.1. Introduction

Les travaux présentés visent à étudier les propriétés mécaniques et physiques des bétons légers incorporant de l'argile expansée et les fibres de lin. Ce chapitre se focalise sur l'ouvrabilité à l'état frais et la masse volumique, les résistances mécaniques, la porosité, l'absorption et la conductivité thermique à l'état durci de ces bétons. Les performances sont évaluées à 28 jours et 90 jours après la fabrication. Les résultats obtenus pour les différentes formulations sont analysés et interprétés.

## IV.2. Résultats et discussion

### IV.2.1. Le béton à l'état frais

#### IV.2.1.1. L'affaissement du béton

Dans cette étude un essai d'affaissement a été réalisé sous la norme de NF EN 206/CN, pour chaque mélange. L'affaissement est défini comme la mesure de l'affaissement d'un mélange de béton frais après compactage. Un affaissement plus élevé indique que le mélange de béton est plus fluide et se répand plus facilement, tandis qu'un affaissement plus faible indique que le mélange est plus rigide et se répand moins facilement. Le graphique présenté l'affaissement du béton en fonction des mélanges :

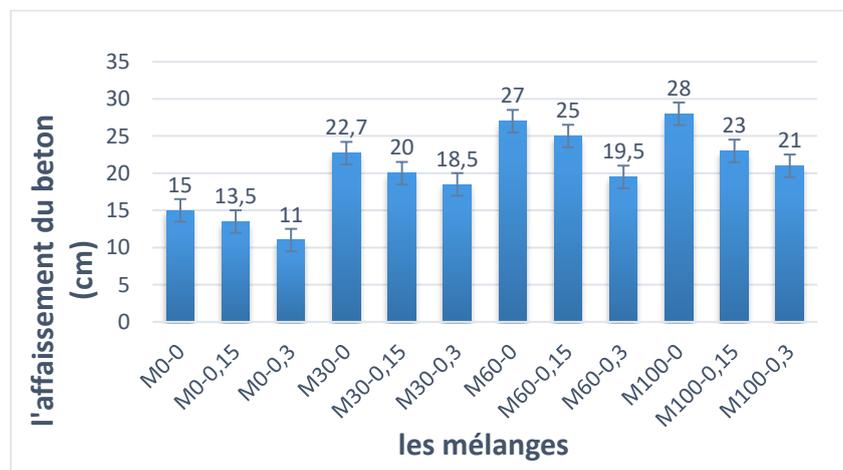


Figure IV.31 : graphique d'affaissement du béton en fonction des mélanges

Les résultats de ce test démontrent que l'utilisation d'argile expansée dans le béton entraîne une augmentation de l'ouvrabilité, ce qui fait passer le béton de l'état très plastique (M0-0) à l'état très fluide (M100-0), pour les mélanges non fibrés, et pour les mélanges fibrés on observe une diminution de l'ouvrabilité grâce aux fibres ajoutés.



Figure IV.32 : L'essai de l'affaissement au cône d'Abrams

#### IV.2.1.1.1. Influence du pourcentage d'argile expansé

On observe que l'affaissement du béton léger augmente avec le pourcentage d'argile expansé. Cela est dû au fait que les particules d'argile expansé ont une forme arrondie et une surface lisse, ce qui réduit le frottement entre les particules et facilite l'écoulement du mélange de béton.

#### IV.2.1.1.2. Influence du pourcentage de fibres de lin

On observe que l'affaissement du béton léger diminue avec l'augmentation du pourcentage de fibres de lin. Cela est dû au fait que les fibres de lin ont une structure fibreuse qui retient l'eau et augmente la viscosité du mélange de béton.

#### IV.2.1.1.3. Comparaison des différents mélanges

- **Béton léger sans argile expansé ni fibres de lin (M0-0)** : Ce mélange a un affaissement de 15 cm, ce qui indique qu'il est le plus plastique et le plus difficile à répandre.



Figure IV.33 : L'affaissement de mélange (0 – 0)

- **Béton léger avec 30% d'argile expansé et sans fibres de lin (M30-0)** : Ce mélange a un affaissement de 22,7 cm, il est plus élevé que le M0-0, mais il est encore très plastique.



Figure IV.34 : L'affaissement de mélange (30-0)

- **Béton léger avec 60% d'argile expansé et sans fibres de lin (M60-0)** : Ce mélange a un affaissement de 27 cm, il est encore plus élevé que le M30-0, et il est plus facile à répandre.
- **Béton léger avec 100% d'argile expansé et sans fibres de lin (M100-0)** : Ce mélange a l'affaissement le plus élevé de tous les mélanges sans fibres de lin, égal 28 cm, et il est le plus fluide et le plus facile à répandre.
- **Béton léger avec 30% d'argile expansé et 0,15% de fibres de lin (M30-0,15)** : Ce mélange a un affaissement de 20 cm, légèrement inférieur au M30-0, mais il est encore fluide.



Figure IV.35 : L'affaissement de mélange (30-0,15)

- **Béton léger avec 30% d'argile expansé et 0,3% de fibres de lin (M30-0,3)** : Ce mélange a un affaissement de 18,5 cm, encore plus faible que le M30-0,15, et il est moins fluide que M30-0,15 et M30-0.



Figure IV.36 : L'affaissement de mélange (30 – 0,3)

- **Béton léger avec 60% d'argile expansé et 0,15% de fibres de lin (M60-0,15)** : Ce mélange a un affaissement de 25 cm, légèrement inférieur au M60-0, mais il est encore relativement fluide.
- **Béton léger avec 60% d'argile expansé et 0,3% de fibres de lin (M60-0,3)** : Ce mélange a un affaissement de 19,5 cm, encore plus faible que M60-0,15, et il est moins fluide que M60-0 et M60-0,15.



Figure IV.37 : L'affaissement de mélange (60 – 0,3)

- **Béton léger avec 100% d'argile expansé et 0,15% de fibres de lin (M100-0,15)** : Ce mélange a un affaissement de 23 cm, légèrement inférieur au M100-0, mais il est encore relativement fluide.
- **Béton léger avec 100% d'argile expansé et 0,3% de fibres de lin (M100-0,3)** : Ce mélange a l'affaissement de 21 cm, encore plus faible que M100-0,15, et il est moins fluide que M100-0 et M100-0,15.

Le pourcentage d'argile expansé et de fibres de lin a un impact significatif sur l'affaissement du béton léger. L'augmentation du pourcentage d'argile expansé augmente l'affaissement, tandis que l'augmentation du pourcentage de fibres de lin diminue l'affaissement. Le choix du pourcentage d'argile expansé et de fibres de lin dépend des propriétés souhaitées du béton léger.

## IV.2.2. Le béton à l'état durci

### IV.2.2.1. La masse volumique :

Cette étude vise à présenter les résultats de la masse volumique de différents mélanges à 28 et 90 jours de cure. Les données seront présentées sous forme de tableau et des graphiques, accompagnées d'une analyse comparative pour mettre en évidence l'évolution de la masse volumique en fonction du temps et de la composition des mélanges.

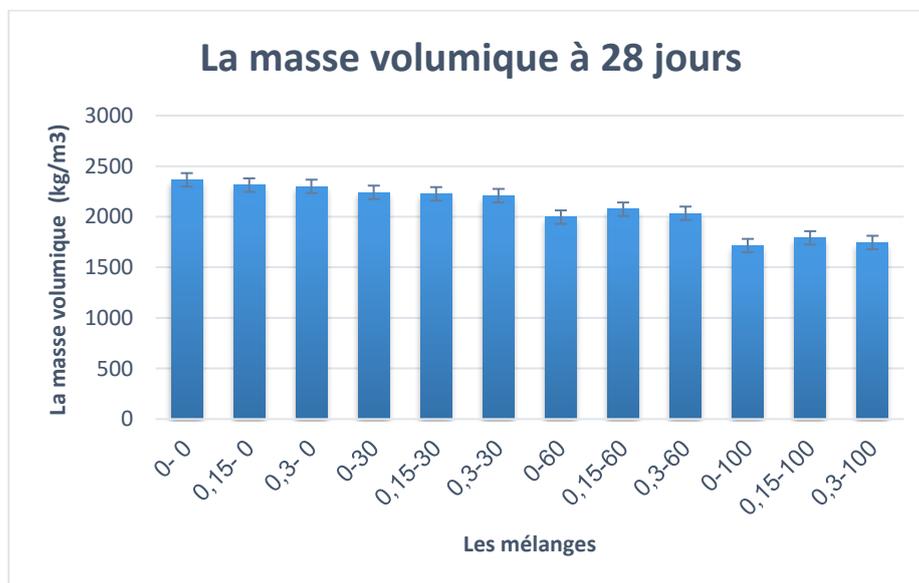


Figure IV.38 : Graphique de la masse volumique à 28 jours

Figure IV.38, on constate que la masse volumique du béton diminue avec l'augmentation du pourcentage d'argile expansée. Cela est dû au fait que les particules d'argile expansée sont beaucoup moins denses que les granulats traditionnels utilisés dans le béton. Pour l'effet du pourcentage de fibres de lin on observe une légère diminution de la masse volumique avec l'augmentation du pourcentage de fibres de lin, mais cette diminution est moins importante que celle due à l'argile expansée. La masse volumique du béton à 28 jours a diminué, passant de 2364,90 kg/m<sup>3</sup> pour le témoin M (0-0) à 2240,98 kg/m<sup>3</sup>, 1996,33 kg/m<sup>3</sup> et 1714,68 kg/m<sup>3</sup>, pour les pourcentages de 30%, 60% et 100% des granulats d'argile expansée, et pour la masse volumique du béton à 90 jours passant de 2334,47 kg/m<sup>3</sup> pour le témoin M (0-0) à 2210,48 kg/m<sup>3</sup>, 1952,30 kg/m<sup>3</sup> et 1679,13 kg/m<sup>3</sup>, pour les pourcentages de 30%, 60% et 100% des

granulats d'argile expansée. Ces derniers permettent de réduire considérablement la densité et le poids du béton par rapport à un béton ordinaire, grâce à leur structure interne poreuse, ce qui est intéressant pour les applications où la légèreté est requise.

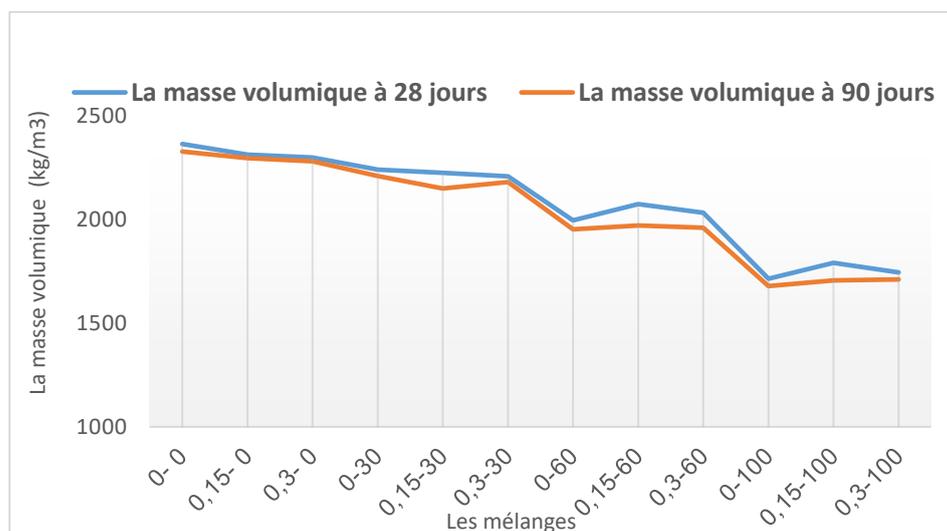


Figure IV.39 : Courbe de la masse volumique du béton à 28/90 jours

Tableau IV.19 : La masse volumique du béton à 28 j et à 90 j

| les mélanges | 28 jours          | 90 jours          |
|--------------|-------------------|-------------------|
| 0 -0         | <b>2364,90573</b> | <b>2328,47813</b> |
| 0 -0,15      | <b>2312,84694</b> | <b>2295,90986</b> |
| 0 -0,3       | <b>2299,99563</b> | <b>2281,49223</b> |
| 30-0         | <b>2240,98445</b> | <b>2210,48882</b> |
| 30-0,15      | <b>2226,39359</b> | <b>2150,28183</b> |
| 30-0,3       | <b>2208,61808</b> | <b>2180,59014</b> |
| 60-0         | <b>1996,3309</b>  | <b>1952,30466</b> |
| 60-0,15      | <b>2074,35034</b> | <b>1971,32677</b> |
| 60-0,3       | <b>2033,82313</b> | <b>1961,33746</b> |
| 100-0        | <b>1714,6895</b>  | <b>1679,13557</b> |
| 100-0,15     | <b>1790,86638</b> | <b>1706,11103</b> |
| 100-0,3      | <b>1745,41108</b> | <b>1710,66181</b> |

La masse volumique de tous les mélanges de béton léger a diminué entre 28 et 90 jours de cure. Cette diminution est attribuée à la continuation du processus d'hydratation du ciment.

#### IV.2.2.2. La résistance à la compression

Les échantillons de béton ont été préparés et testés à 28 et 90 jours. Les valeurs de la résistance à la compression obtenues ont été déterminées en prenant la moyenne de trois échantillons. Les tests ont été effectués à l'aide d'une machine de test de compression.



Figure IV.40 : Machine de mesurer la résistance à la compression

Le tableau 20 et le graphique présenté illustre l'effet de l'incorporation de différents pourcentages d'argile expansée et de fibres de lin sur la résistance à la compression du béton léger à 28 et 90 jours.

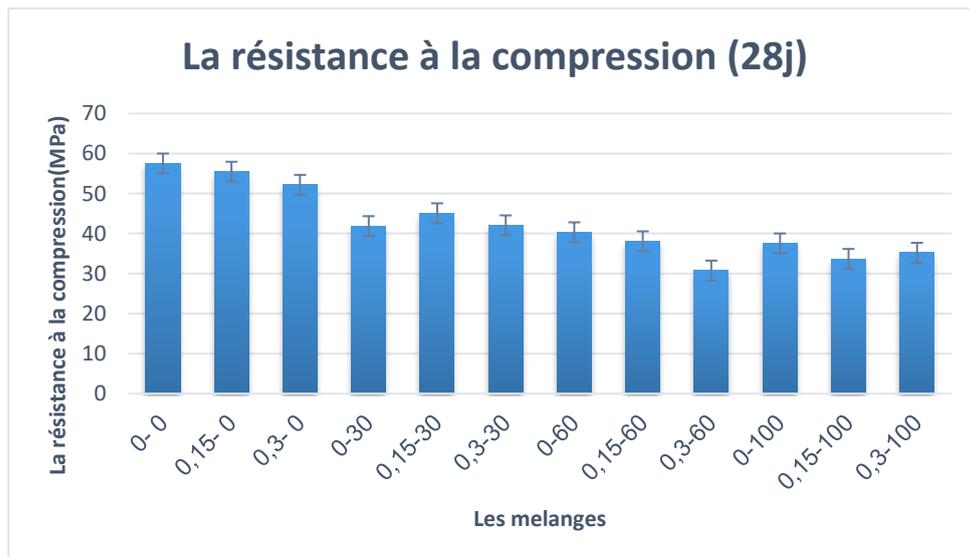


Figure IV.41 : Graphique de la résistance à la compression à 28 jours en fonction des mélanges

On observe une diminution générale de la résistance à la compression avec l'augmentation du

pourcentage d'argile expansée. Le mélange témoin M (0-0) présente la plus haute résistance, avec une résistance à la compression de 57,52 MPa, on constate que l'introduction de 0,15% et 0,3% de fibre de lin dans le béton révèle une diminution de la résistance à la compression à 28 jours de 3,57% et 9,25% respectivement par rapport au M (0-0). Pour le pourcentage de 30% de l'argile expansée, avec 0%, 0,15% et 0,3% fibre de lin, donne une résistance de 41,86 MPa, 45,08 MPa et 42,06 MPa, avec un pourcentage de diminution de 27,21%, 21,62% et 26,86% respectivement par rapport au témoin, le pourcentage de 60% de l'argile expansée, avec 0%, 0,15% et 0,3% fibre de lin, donne une résistance de 40,33MPa, 38,08MPa et 30,76MPa, avec un pourcentage de diminution de 29,87%, 33,78% et 46,51% respectivement par rapport au témoin, l'introduction des fibres provoque une diminution de la résistance. Le remplacement total du gravier par de l'argile expansée (pourcentage 100%), avec 0%, 0,15% et 0,3% fibre de lin, donne une résistance de 37,55 MPa, 33,68 MPa et 35,21 MPa, avec un pourcentage de diminution de 34,71%, 41,44% et 38,77% respectivement par rapport au témoin.

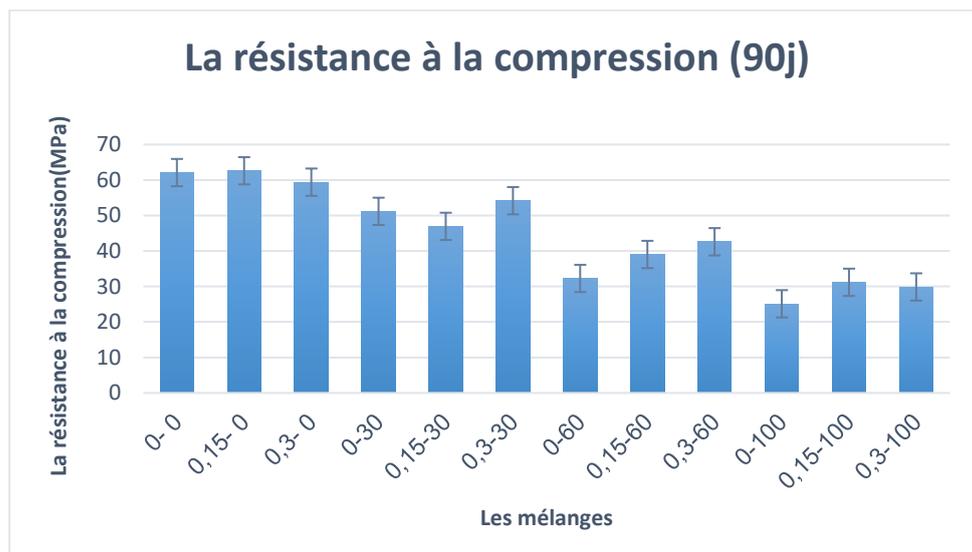


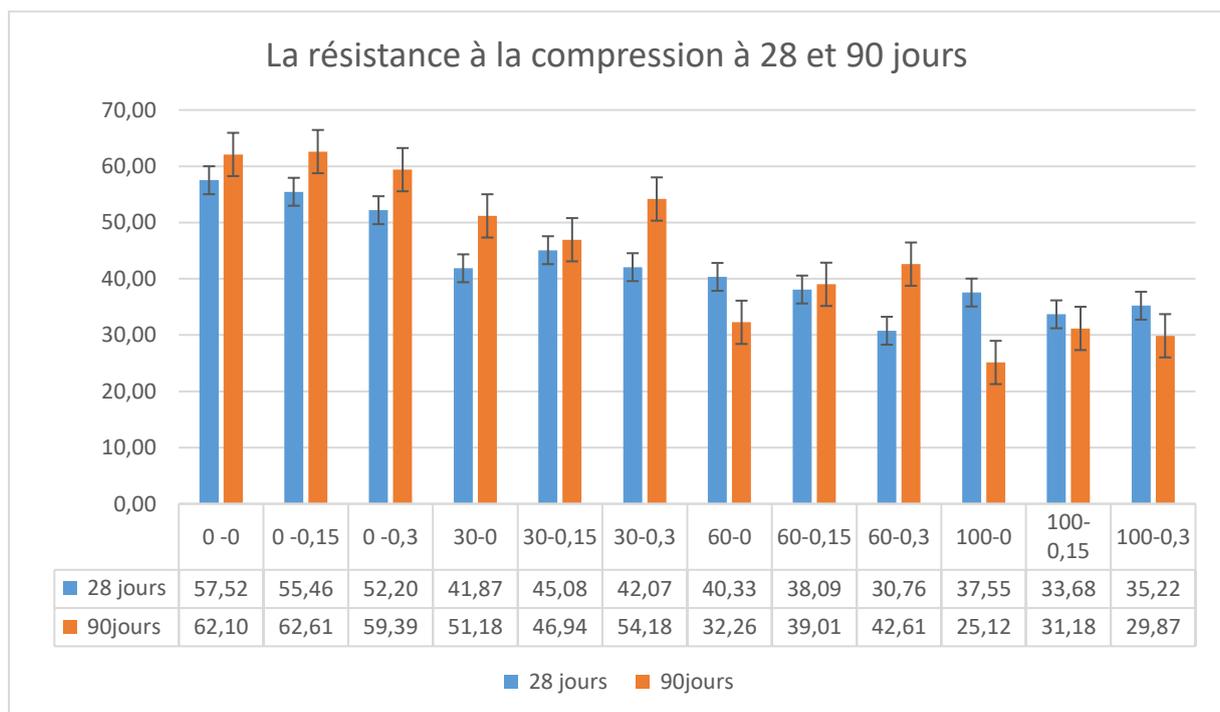
Figure IV.42 : Graphique de la résistance à la compression à 90 jours en fonction des mélanges

Le mélange témoin M (0-0) présente la plus haute résistance, Avec une résistance à la compression de 62,63 MPa, on constate que l'introduction de 0,15% et 0,3% de fibre de lin dans le béton révèle une diminution de la résistance à la compression à 90 jours de 0,92% et 5,16% respectivement par rapport au M (0-0). Pour le pourcentage de 30% de l'argile expansée, avec 0%, 0,15% et 0,3% fibre de lin, donne une résistance de 51,17 MPa, 46,94 MPa et 54,17 MPa, avec un pourcentage de diminution de 18,29%, 25,05% et 13,50% respectivement par rapport au témoin, le pourcentage de 60% de l'argile expansée, avec 0%, 0,15% et 0,3% fibre de lin, donne une résistance de 32,26MPa, 39,01MPa et 42,60 MPa, avec un pourcentage de diminution de 48,49%, 37,71% et 31,97% respectivement par rapport au témoin, l'introduction

des fibres provoque une diminution de la résistance. Le remplacement total du gravier par l'argile expansée (pourcentage 100%), avec 0%, 0,15% et 0,3% fibre de lin, donne une résistance de 25,12 MPa, 31,18 MPa et 29,89 MPa, avec un pourcentage de diminution de 59,88%, 50,22% et 52,31% respectivement par rapport au témoin.

La résistance est généralement plus faible que celle d'un béton ordinaire en raison de la plus grande porosité et de la moindre résistance des granulats légers eux-mêmes. Les fibres ont tendance à s'agglomérer, créant des zones où la distribution des fibres n'est pas homogène, ces zones d'agglomération peuvent piéger de l'air et empêcher la pâte de ciment de s'écouler correctement, formant des vides et des zones poreuses. La présence de ces vides et zones poreuses augmente la porosité globale du béton, fragilisant sa matrice, et donc réduisant sa capacité à résister aux contraintes de compression.

Le choix du pourcentage d'argile expansée et de fibres de lin dépend des propriétés souhaitées du béton léger.



**Figure IV.43 La résistance à la compression à 28 et 90 jours**

Une diminution de la résistance à la compression entre 28 et 90 jours a été observée pour les mélanges contenant plus de 60% d'agrégats d'argile expansée. Cette réduction peut être expliquée par plusieurs facteurs : Absorption et Désorption d'Eau : Les agrégats d'argile expansée continuent à absorber et à désorber de l'eau sur une longue période, entraînant des cycles de gonflement et de contraction. Cela crée des tensions internes et favorise la formation de microfissures. Dégradation de l'Interface Agrégat-Matrice : Les cycles de gonflement et de rétrécissement affaiblissent l'adhésion entre les agrégats d'argile et la matrice de ciment,

particulièrement au niveau de la zone de transition inter-faciale (ZTI), qui est la région la plus vulnérable.

L'incorporation de fibres de lin dans les mélanges a montré une réduction de la diminution de la résistance à la compression, particulièrement pour les mélanges contenant de l'argile expansée. Les fibres jouent un rôle crucial en résistance aux Fissures : Les fibres de lin agissent comme des ponts à travers les microfissures, limitant leur propagation et contribuant à maintenir l'intégrité structurelle du béton. Répartition des Tensions Internes : Elles répartissent les tensions de manière plus homogène, réduisant les concentrations de tensions locales et les risques de fissuration. Amélioration de l'Adhésion : Les fibres renforcent la ZTI et améliorent l'adhérence entre les agrégats d'argile et la matrice de ciment, réduisant ainsi le risque de fissuration.

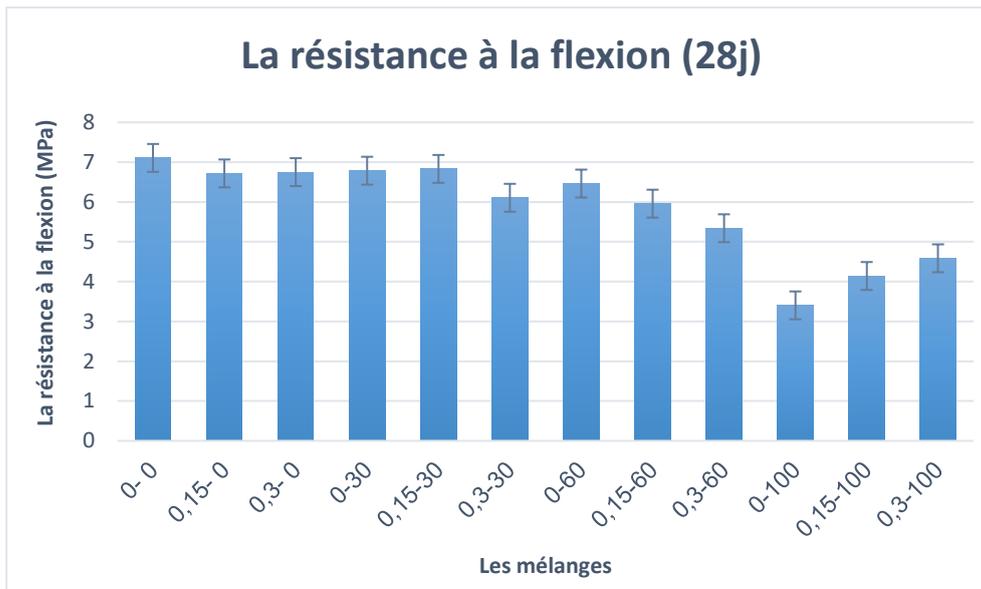
#### **IV.2.2.3. Résistance à la flexion**

Des échantillons de béton ont été testés après 28 jours. La résistance à la flexion a été calculée en faisant la moyenne des résultats de trois échantillons identiques. Les tests ont été réalisés à l'aide d'une machine de flexion dédiée.



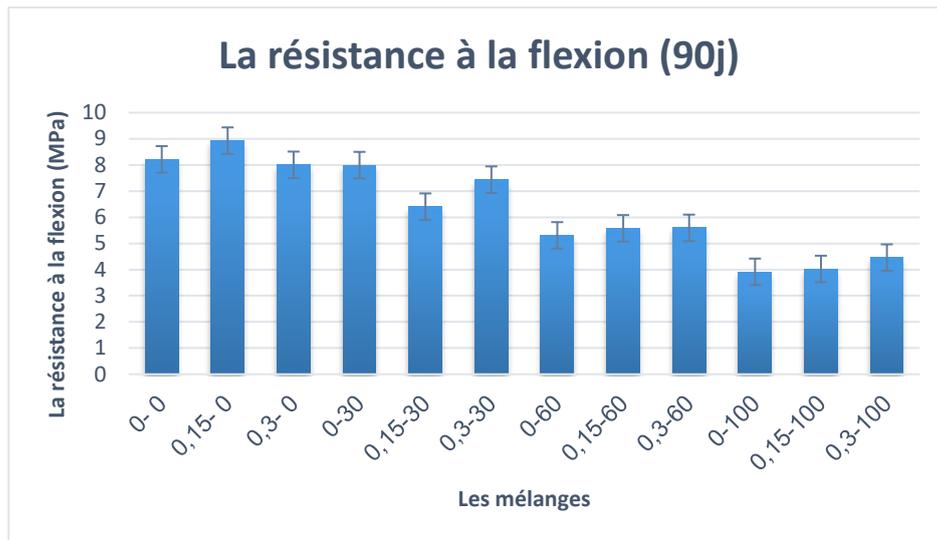
**Figure IV.44 : Machine de mesurer la résistance à la flexion**

Le graphique présenté illustre l'impact de l'ajout d'argile expansée et de fibres de lin à des proportions variables sur la résistance à la flexion du béton léger à 28 jours.



**Figure IV.45 : Graphique de la résistance à la flexion à 28 jours en fonction des mélanges**

L'augmentation du pourcentage d'argile expansée. Provoque une diminution générale de la résistance à la flexion Cela est dû au fait que les particules d'argile expansée sont plus fragiles que les granulats traditionnels utilisés dans le béton, tels que le gravier. Le mélange témoin M(0-0) présente la plus haute résistance , Avec une résistance à la flexion de 7,10 MPa, on constate que l'introduction de 0,15% et 0,3% de fibre de lin dans le béton révèle une diminution de la résistance à la flexion à 28 jours de 5,48% et 5,02% respectivement par rapport au témoin Pour le pourcentage de 30% de l'argile expansée , avec 0%, 0,15% et 0,3% fibre de lin , donne une résistance de 6,75MPa , 6,83 MPa et 6,10 MPa ,avec un pourcentage de diminution de 4,51% , 3,87% et 14,08% respectivement par rapport au témoin , le pourcentage de 60% de l'argile expansée , avec 0%, 0,15% et 0,3% fibre de lin , donne une résistance de 6,64 , 5,95MPa et 5,34MPa ,avec un pourcentage de diminution de 9,06% , 16,16% et 24,84% respectivement par rapport au témoin , l'introduction des fibres provoque une diminution de la résistance. Le remplacement total du gravier par de l'argile expansée (pourcentage 100%), avec 0%, 0,15% et 0,3% fibre de lin, donne une résistance de 3,4 MPa, 4,14 MPa et 4,58 MPa, avec un pourcentage de diminution de 52,11%, 41,72% et 35,47% respectivement par rapport au témoin, qui ne contient pas d'argile expansée.



**Figure IV.46 : Graphique de la résistance à la flexion à 90 jours en fonction des mélanges**

Le mélange M (0-0,15) présente la plus haute résistance à la flexion 8,92 MPa, grâce à l'introduction de 0,15 % FL, avec une augmentation de 8,75% par rapport au témoin M (0-0) qui a atteint une résistance de 8,21 MPa, et 8 MPa pour M (0-0,3). L'incorporation de 0%, 0,15% et 0,3% de FL avec 30% de l'argile expansée révèle une diminution de 2,64%, 21,97% et 9,40% respectivement par rapport au témoin. Pour le remplacement du 60% de l'argile expansée avec 0%, 0,15% et 0,3% fibre de lin, donne une résistance de 5,31 Mpa 5,58 MPa 5,59 MPa avec un pourcentage de diminution de 35,36%, 32,07% et 31,86% respectivement par rapport au témoin, le pourcentage de 100% de l'argile expansée, avec 0%, 0,15% et 0,3% fibre de lin , donne une résistance de 3,91 MPa, 4,02 MPa et 4,46MPa ,avec un pourcentage de diminution de 52,33% ,51,00% et 45,70% respectivement par rapport au témoin .

Les résultats de cet essai montrent que l'utilisation de fibres de lin peut partiellement compenser la perte de résistance à la flexion due à l'incorporation d'argile expansée dans le béton. L'effet des fibres de lin est plus important pour les mélanges avec un faible pourcentage d'argile expansée.

**Tableau IV.20 :la résistance à la compression 28 et 90 jours**

| <b>les mélanges</b> | <b>28 jours</b> | <b>90 jours</b> |
|---------------------|-----------------|-----------------|
| <b>0 -0</b>         | <b>7,11</b>     | <b>8,21</b>     |
| <b>0 -0,15</b>      | <b>6,72</b>     | <b>8,93</b>     |
| <b>0 -0,3</b>       | <b>6,75</b>     | <b>8,00</b>     |
| <b>30-0</b>         | <b>6,79</b>     | <b>7,99</b>     |
| <b>30-0,15</b>      | <b>6,83</b>     | <b>6,41</b>     |
| <b>30-0,3</b>       | <b>6,11</b>     | <b>7,44</b>     |
| <b>60-0</b>         | <b>6,46</b>     | <b>5,31</b>     |
| <b>60-0,15</b>      | <b>5,96</b>     | <b>5,58</b>     |
| <b>60-0,3</b>       | <b>5,34</b>     | <b>5,59</b>     |
| <b>100-0</b>        | <b>3,40</b>     | <b>3,91</b>     |
| <b>100-0,15</b>     | <b>4,14</b>     | <b>4,02</b>     |
| <b>100-0,3</b>      | <b>4,59</b>     | <b>4,46</b>     |

#### **IV.2.2.4. La porosité**

Conformément à la norme NBR 9778, l'essai de porosité accessible à l'eau s'impose comme une méthode expérimentale rigoureuse pour mesurer le volume des pores interconnectés à la surface d'un échantillon de béton. Pour cela les opérations sont effectuées dans l'ordre suivant :

- Séchage de l'échantillon à l'étuve à une température constante jusqu'à masse constante (environ 105°C).
- Noter la masse sèche de l'échantillon (Msec).
- Immersion dans un bac à eau à  $20 \pm 2$  °C durant 72 h et jusqu'à masse humide constante
- Noter la masse saturée de l'échantillon (M saturé).
- Peser les éprouvettes dans une balance hydrostatique.



Figure IV.47 : Balance hydrostatique

- Noter la masse hydrostatique (Hydro)

L'application des formules ci-dessous permet de déterminer la densité et la porosité des éprouvettes, les résultats sont illustrés dans le tableau IV.21, et présentés dans les figures IV.48 et IV.49 :

Tableau IV.22 : Porosité accessible à l'eau

| <b>Porosité accessible à l'eau</b> |      |          |         |          |          |
|------------------------------------|------|----------|---------|----------|----------|
| Les mélanges                       | Msec | M saturé | M hydro | Densité  | Porosité |
| M0-0                               | 2283 | 2402     | 1393    | 2,380575 | 0,1179   |
| M0-0,15                            | 2237 | 2354     | 1344    | 2,330693 | 0,1158   |
| M0-0,3                             | 2181 | 2293     | 1323    | 2,363918 | 0,1155   |
| M30-0                              | 2219 | 2349     | 1320    | 2,282799 | 0,1263   |
| M30-0,15                           | 2053 | 2192     | 1197    | 2,203015 | 0,1397   |
| M30-0,3                            | 2128 | 2253     | 1230    | 2,202346 | 0,1222   |
| M60-0                              | 2032 | 2158     | 1169    | 2,182002 | 0,1274   |
| M60-0,15                           | 1667 | 1794     | 791     | 1,788634 | 0,1266   |
| M60-0,3                            | 1809 | 1942     | 951     | 1,959637 | 0,1342   |
| M100-0                             | 1501 | 1662     | 730     | 1,783262 | 0,1727   |
| M100-0,15                          | 1610 | 1792     | 727     | 1,682629 | 0,1709   |
| M100-0,3                           | 1690 | 1878     | 796     | 1,735675 | 0,1738   |

$$densité = \frac{M_{saturé}}{M_{saruré} - M_{hydro}}$$

$$porosité = \frac{M_{saturé} - M_{sec}}{M_{saruré} - M_{hydro}} \times 10$$

#### IV.2.2.4.1. La porosité

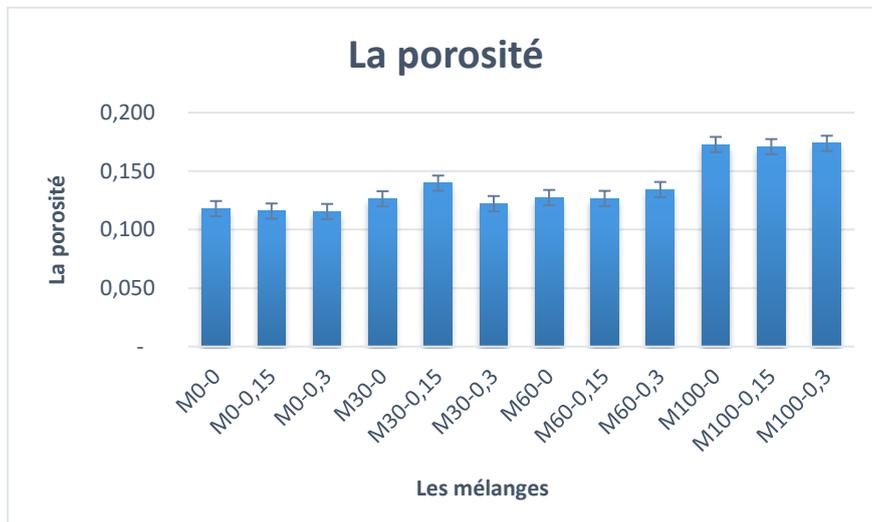


Figure IV.50 : Graphique de la porosité en fonction des mélanges

L'analyse du graphique de porosité révèle des tendances intéressantes pour les différents mélanges étudiés. On observe une augmentation générale de la porosité avec l'accroissement du pourcentage d'argile expansée, les mélanges M0 (0% d'argile) présentant la porosité la plus basse (environ 0,12), tandis que les mélanges M60 et M100 (60% et 100% d'argile) affichent les valeurs les plus élevées (0,16 à 0,18). L'ajout de 0,15% de fibres semble augmenter légèrement la porosité par rapport aux mélanges sans fibres, tandis que l'effet de 0,3% de fibres varie selon le pourcentage d'argile. Il est notable que les mélanges M100 présentent la porosité la plus élevée avec une augmentation de 47,4% par rapport au témoin.

En conclusion, l'argile expansée s'avère être le facteur principal influençant la porosité, avec une augmentation significative à mesure que sa proportion augmente. Les fibres de lin jouent un rôle secondaire, tendant généralement à accroître légèrement la porosité, mais leur effet reste moins marqué que celui de l'argile expansée. La combinaison d'une forte teneur en argile expansée et de fibres de lin produit les mélanges les plus poreux. Ces observations suggèrent que la porosité du mélange peut être principalement contrôlée en ajustant la teneur en argile expansée, avec un ajustement plus fin possible grâce à l'ajout de fibres de lin.

#### IV.2.2.4.2. La densité

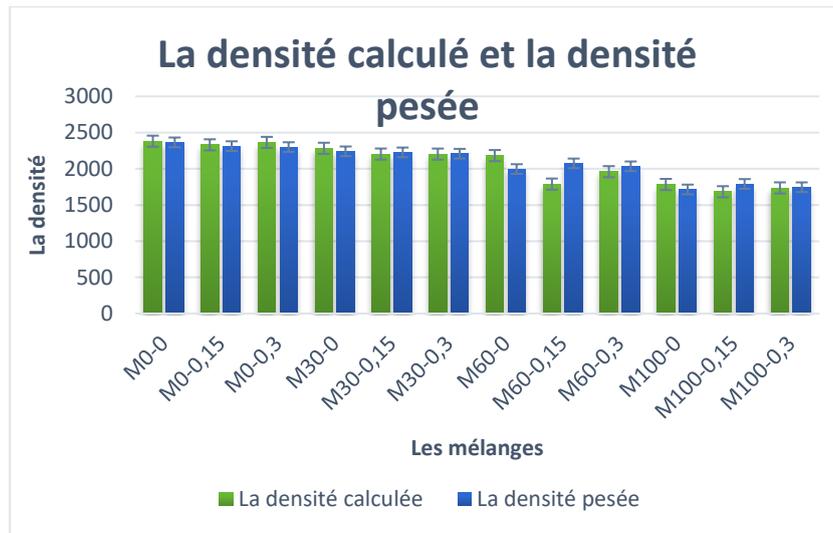


Figure IV.51 : La densité calculé et la densité pesée en fonction des mélanges

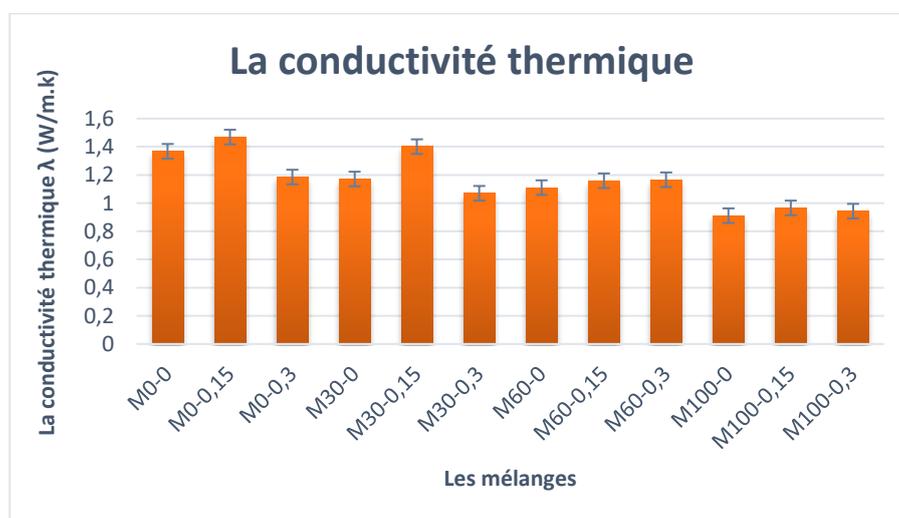
L'analyse du graphique ci-dessous révèle une remarquable proximité entre les densités calculées et pesées pour chaque mélange. Cette concordance témoigne de la précision des calculs théoriques et de la fiabilité des mesures expérimentales. Elle suggère également une grande homogénéité dans la préparation des échantillons. Cette correspondance étroite entre les valeurs calculées et mesurées renforce la confiance dans les résultats obtenus et souligne la rigueur méthodologique de l'étude. Elle permet d'affirmer que les densités calculées sont effectivement justes et représentatives des propriétés réelles des mélanges étudiés.

#### IV.2.2.5. La conductivité thermique et la chaleur spécifique

L'évaluation des propriétés thermiques dans notre étude s'effectue au moyen d'un instrument appelé "CT METRE", conformément à la norme NF EN 993-15. Il s'agit d'un appareil développé par le CSTB Grenoble. Pour déterminer les propriétés thermiques du matériau étudié, nous avons opté pour une sonde à anneau de type Ø 15.R (diamètre 15 mm). Ce choix permet de mesurer à la fois la conductivité thermique et la chaleur spécifique du matériau. La sonde est insérée entre deux faces planes d'un échantillon prismatique de dimensions 10×10×10 cm<sup>3</sup>, avec une température d'essai :  $T_0 = 21,77 \pm 2$  °C, et donne les résultats présentés dans le tableau 3 et les figures 4 et 5 :

**Tableau IV.23 : Conductivité thermique et chaleur spécifique les mélanges**

| les mélanges | Conductivité thermique $\lambda$ (W/m.k) | Chaleur spécifique (KJ/m <sup>3</sup> . k) |
|--------------|--|--|
| M0-0         | 1,368                                    | 2721                                       |
| M0-0,15      | 1,469                                    | 2998,3                                     |
| M0-0,3       | 1,185                                    | 2500                                       |
| M30-0        | 1,171                                    | 2348,6                                     |
| M30-0,15     | 1,401                                    | 2883,7                                     |
| M30-0,3      | 1,07                                     | 2419,9                                     |
| M60-0        | 1,11                                     | 2284,7                                     |
| M60-0,15     | 1,159                                    | 2659,8                                     |
| M60-0,3      | 1,166                                    | 2420                                       |
| M100-0       | 0,911                                    | 2350,8                                     |
| M100-0,15    | 0,966                                    | 2136,2                                     |
| M100-0,3     | 0,943                                    | 2048                                       |



**Figure IV.52 : La conductivité thermique en fonction des mélanges**

L'analyse du graphique de conductivité thermique révèle l'influence significative de l'argile expansée et des fibres de lin sur les propriétés isolantes des mélanges. On observe une diminution de la conductivité thermique à mesure que le pourcentage d'argile expansée augmente de 0% à 100%, Cette tendance indique clairement les propriétés isolantes de l'argile expansée. Concernant l'effet des fibres de lin, il est intéressant de noter que le pourcentage optimal pour la conductivité thermique semble être de 0,15%. En effet, pour la plupart des

niveaux d'argile expansée, les mélanges contenant 0,15% de fibres de lin présentent une conductivité thermique légèrement plus favorable que ceux à 0% ou 0,3%. Cette observation suggère qu'une petite quantité de fibres de lin peut améliorer les propriétés isolantes. La combinaison d'une forte proportion d'argile expansée avec 0,15% de fibres de lin semble donc offrir un bon compromis pour optimiser la conductivité thermique des mélanges.

#### IV.2.2.6. La chaleur spécifique

La chaleur spécifique est une propriété importante pour évaluer la capacité d'un matériau à stocker la chaleur. Les résultats obtenus

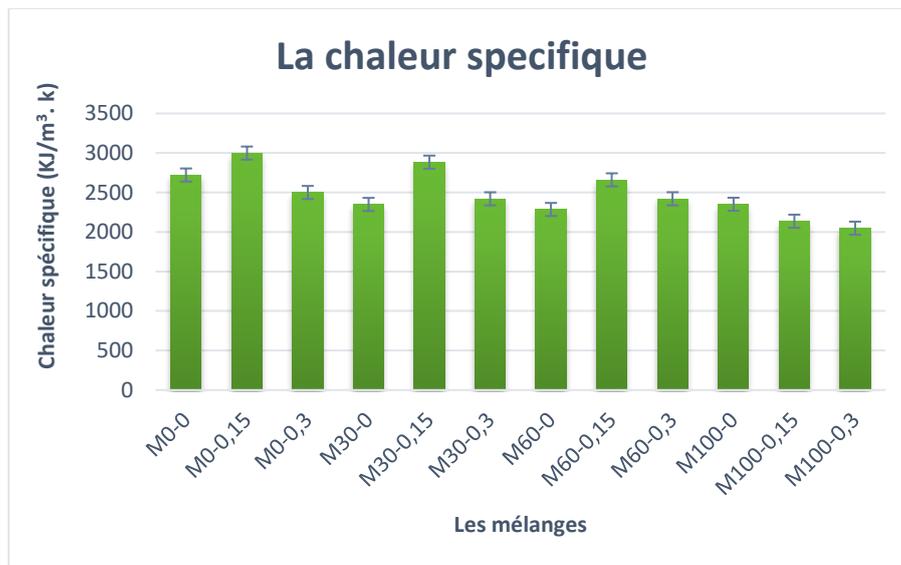


Figure IV.53 : La chaleur spécifique en fonction des mélanges

Le remplacement du gravier par de l'argile expansée entraîne une légère diminution de la chaleur spécifique des mélanges. Cela est dû à la densité plus faible de l'argile expansée par rapport au gravier, ce qui entraîne une capacité calorifique plus faible.

Les données de chaleur spécifique peuvent être utilisées pour évaluer la performance thermique et l'efficacité énergétique des structures en béton.

#### IV.2.2.7. L'essai ultrasonique

Nous avons appliqué cet essai à nos différents mélanges de béton léger à 28 jours, incorporant diverses proportions d'argile expansée et de fibres de lin. L'objectif était d'observer comment ces composants affectent la propagation des ondes sonores, ce qui nous renseigne indirectement sur la microstructure du béton. Les résultats de cet essai (figure 52) nous permettent d'évaluer l'homogénéité du matériau

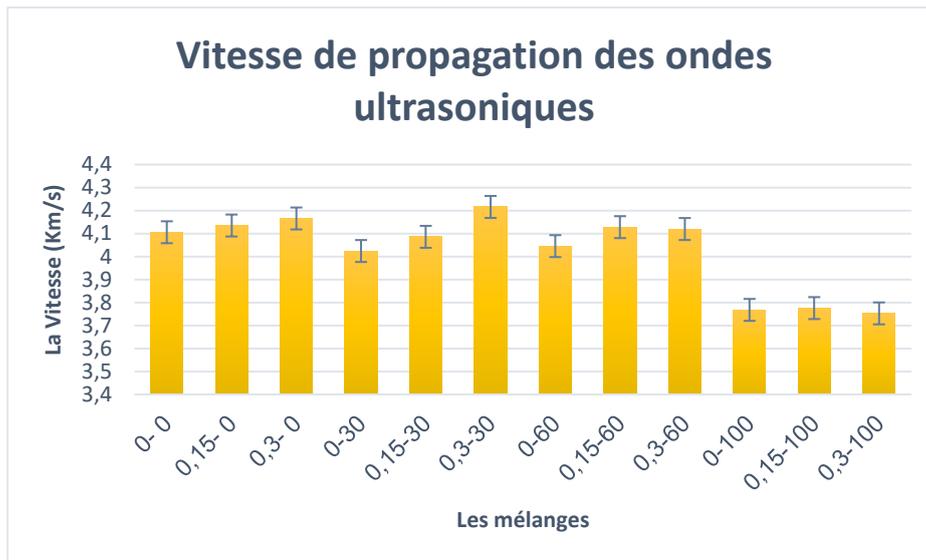


Figure IV.54 : Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques

On observe une diminution générale de la vitesse ultrasonique à mesure que le pourcentage d'argile expansée augmente de 0% à 100%. Ceci suggère que l'ajout d'argile expansée augmente la porosité du béton, ralentissant ainsi la propagation des ondes sonores. On constate aussi une tendance à l'augmentation de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques avec l'accroissement du pourcentage de fibres de lin. Cette observation peut s'expliquer par le rôle des fibres dans la réduction des microfissures au sein de la matrice du béton. En effet, les fibres de lin agissent comme des ponts microscopiques, limitant la formation et la propagation des microfissures.

### IV.3. Conclusion

En conclusion de ce chapitre consacré aux résultats et à la discussion, notre étude approfondie sur le béton léger à base d'argile expansée et renforcé de fibres de lin a révélé des informations précieuses sur ses propriétés mécaniques, physiques et thermiques.

Les essais de compression et de flexion réalisés à 28 et 90 jours ont permis d'évaluer l'évolution de la résistance mécanique du matériau dans le temps. Ces résultats ont mis en évidence l'influence de l'argile expansée sur la réduction de la résistance, ainsi que le rôle compensateur des fibres de lin dans le maintien des propriétés mécaniques.

L'analyse de la porosité accessible à l'eau a fourni des indications cruciales sur la structure interne du béton, permettant de mieux comprendre les mécanismes qui influencent sa résistance et sa durabilité. Parallèlement, les mesures de densité ont confirmé l'efficacité de l'argile expansée dans la réduction du poids du béton, un aspect essentiel pour son application en tant que matériau léger.

Les essais de conductivité thermique et de chaleur spécifique ont révélé les propriétés isolantes prometteuses de ce béton léger. Ces caractéristiques thermiques, combinées aux propriétés mécaniques et physiques, offrent un potentiel intéressant pour des applications dans la construction durable.

## Conclusion générale

En conclusion, cette étude sur les caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques du béton léger à base d'argile expansée renforcé par des fibres de lin a permis d'approfondir notre compréhension de ce matériau innovant.

L'incorporation d'argile expansée en proportions croissantes (0%, 30%, 60%, 100%) a démontré son efficacité pour réduire la densité du béton et améliorer ses propriétés isolantes thermiques. Cependant, comme attendu, cette réduction de densité s'est accompagnée d'une diminution de la résistance mécanique, principalement due à la porosité accrue de l'argile expansée.

L'ajout de fibres de lin (0%, 0,15%, 0,3%) a joué un rôle crucial en atténuant la perte de résistance à la compression, particulièrement dans les mélanges contenant de l'argile expansée. Cette observation souligne le potentiel des fibres naturelles comme renfort dans les bétons légers.

Les essais de caractérisation, notamment l'affaissement à l'état frais, la compression et la flexion à 28 et 90 jours, ainsi que les mesures de porosité, densité et vitesse ultrasonique, ont fourni une vision complète des propriétés du matériau. Ces résultats ont mis en évidence les compromis entre légèreté, isolation thermique et performance mécanique.

Cette recherche ouvre la voie à de nouvelles perspectives dans le développement de bétons légers écologiques. Elle souligne l'importance d'optimiser le dosage entre l'argile expansée et les fibres de lin pour obtenir un équilibre optimal entre les propriétés thermiques et mécaniques. Des études futures pourraient explorer davantage la durabilité à long terme de ces mélanges, leur résistance aux conditions environnementales variées, et leur potentiel d'application dans différents secteurs de la construction. L'optimisation de la formulation et des techniques de mise en œuvre pourrait également permettre d'améliorer encore les performances de ce matériau prometteur.

En somme, cette étude contribue significativement à l'avancement des connaissances sur les bétons légers renforcés de fibres naturelles, offrant des perspectives intéressantes pour le développement de matériaux de construction plus durables et écologiques.

## V. Références

- [1] A. NEVILLE, «*Propriétés des bétons*», Eyrolles. Paris, 2000.
- [2] B. BENKHALFA, «*contribution a l'étude des bétons légers d'argile expansée pour des éléments*», Thèse de magistère. Université d'Annaba, 1988.
- [3] DAMENE Zineb, «*Valorisation des sables de dunes de la région de Laghouat: étude de bétons cellulaires à base de sable de dune, chaux, ciment et poudre d'aluminium*», Thèse de Doctorat, UNIVERSITÉ AMAR TÉLIDJI DE LAGHOUAT, 2017.
- [4] Ana M. Bastos Sousa Hipólito, F. Melo António, *Methodology for the design of lightweight concrete with expanded clay aggregates*, TMS J. (2005) 73–84..
- [5] M. Contant, «*Confection de bétons légers pour la fabrication d'éléments architecturaux* », Projet d'application présenté à l'Ecole de Technologie Supérieure, 2001.
- [6] Ziregue Ahmed , «*Valorisation de coproduits industriels influence de différents facteurs d'allègement sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques d'un béton amatrice calcaire-ciment*», Thèse de Magister, l'UAT de Laghouat, 1993.
- [7] ACOBS & MAYER, «*JACOBS & MAYER: Porosity and permeability of autoclaved aerated concrete*», 1992.
- [8] M.FESTA et M.DREUX, *Nouveau guide du béton et de ses constituants*, Liver, 1998.
- [9] M. Arnould et M. Virlogeux, «*Granulats et bétons légers*», Livre, 1986.
- [10] JOHN L, CLARKE, «*Structural lightweight Aggregate Concrete*», Edité par l'ingénieur en chef des structures British Cement Association Crowthorne , 1993.
- [11] B. Linda, «*Comportement structurel du béton léger à base d'argile expansée de bouinan*», these de magister, 1991.
- [12] Tafiani Abdelkarim ,Slimane Zitoun Ibrahim, *Formulation d'un béton a base de granulats legers*, Blida: Memoire de master, 2020.
- [13] M. Rashad , «*Lightweight expanded clay aggregate as a building material*», page d'accueil Journal: [www.elsevier.com/locate/conbuildmat](http://www.elsevier.com/locate/conbuildmat) , 2018.
- [14] Youm KwangSoo, Moon Jiho, Cho Jae-Young, Jung J. Kim, *Experimental study on strength and durability of lightweight aggregate concrete containing silica fume*, Construct. Build. Mater.517–527., 2016.

- [15] Bogas J. Alexandre, Nogueira Rita, *Tensile strength of structural expanded clay lightweight concrete subjected to different curing conditions*, KSCE J. Civ. Eng. 1780–1791., 2014.
- [16] Bogas J. Alexandre, Gomes Augusto, *Compressive behavior and failure modes of structural lightweight aggregate concrete – Characterization and strength prediction*, Mater. Design 46 (2013) 832–841..
- [17] V. Corinaldesi, G. Moriconi,, *Use of synthetic fibers in self-compacting lightweight aggregate concrete*, J. Build. Eng. 4 (2015) 247–254..
- [18] Anis A. Ali, Lazim Hussein. Mohamad, *Experimental study of the behavior of deep beams using light-weight structural leca concrete*, Int. J. Innovat. Res. Sci. Eng. Technol. 5 (1) (2016) 428–436.
- [19] C.S. Nepomuceno Miguel, L.A. Pereira-de-Oliveira, Sandrine F. Pereira, *Mix design of structural lightweight self-compacting concrete incorporating coarse lightweight expanded clay aggregates*, Constr. Build. Mater. 166 , 373–385., 2018.
- [20] Shafigh Payam, Ghafari Hafez, Bin Mahmud Hilmi, Jumaat Mohd Zamin, *A comparison study of the mechanical properties and drying shrinkage of oil palm shell and expanded clay lightweight aggregate concretes*, Mater. Des. 60 , 320–327, 2014.
- [21] H. Sousa, A. Carvalho, A. Melo,, *A new sound insulation lightweight concrete masonry block. Design and experimental characterization*, In: 13th International Brick and Block Masonry Conference, Amsterdam, July 4–7, 2004.
- [22] M. Hubertova, R. Hela, *Ultra light-weight self consolidating concrete Challenges*, Opport. Sol. Struct. Eng. Construct. 575–579., 2010.
- [23] M.SHINK, «*Compatibilité élastique, Comportement mécanique et optimisation Des bétons de granulats légers*», Université Laval Québec, 2003.
- [24] Hepworth, , D. G., D. M. Bruce, J. F. V. Vincent, et G. Jeronimidis«*The manufacture and mechanical testing of thermosetting natural fibre composites*», Journal of Materials Science 35, 293-298, 2000.
- [25] Olesen, P. O et D. V ,Plackett, «*Plackett Perspectives on the performance of natural plant fibres.*», 1999.
- [26] Jörg Müssig, H. H. , «*Caractérisation des fibres de chanvre*», , p. 10. Présenté à Journée scientifique du chanvre, Montjean-sur-Loire, France., 1999.

- [27] Baley, C., «*Contribution à l'étude de matériaux composites à matrice organique renforcés par des fibres de lin*», (Thèse d'HDR). Université de Bretagne Sud, Lorient, France., 2003.
- [28] M.Bourgeois, «*Fibres agrosourcées. In Techniques de l'ingénieur. Techniques de l'ingénieur.*», 2011.
- [29] Baley, C. , «*Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. In Techniques de l'ingénieur. Techniques de l'ingénieur.*», 2013a.
- [30] Page, Jonathan, «*Formulation et caractérisation d'un composite cimentaire biofibré pour des procédés de construction préfabriquée*», Génie civil. Normandie Université. Français, 2017.
- [31] USRTL, «*Le lin textile en 10 étapes. Union Syndicale des Rouisseurs-Teilleurs de Lin*», 2012.
- [32] Brink, M. et E. G. Achigan-Dako, «*Plantes à fibres*» Wageningen, Pays-Bas: Fondation PROTA - CTA., Wageningen, Pays-Bas: Fondation PROTA - CTA., 2012.
- [33] De Vestele, C. et C. Dauriac, «*60 Linen and Hemp icons*», CELC, 2009.
- [34] Gram, H.-E, «*Durability of Natural Fibres in Concrete*», Stockholm, Suède: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1983.
- [35] Bledzki, A, «*Composites reinforced with cellulose based fibres*», Progress in Polymer Science 24, 221-274., 1999.
- [36] Baley, C, «*Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase*», Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 33, 939-948, 2002.
- [37] Magniont, C, «*Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources (PhD thesis)*», Université Paul Sabatier - Toulouse III, Toulouse, France., 2011.
- [38] Chafei, S, F. Khadraoui, M. Boutouil, et M. Gomina. «*Optimizing the formulation of flax fiberreinforced cement composites*», Construction and Building Materials 54, 659-664., 2014.
- [39] Ramakrishna, G, et T. Sundararajan. «*Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs: a comparative study*», Cement and Concrete Composites 27, 547-553, 2005.

- [40] Savastano, H, V. M. John, V. Agopyan, et O. P. Ferreira. «*Weathering of vegetable fibre-clinker free cement composites*», *Materials and Structures* 35, 64-68., 2002.
- [41] Toledo Filho, R, D., K. Ghavami, G. L. England, et K. Scrivener. «*Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability*», *Cement and Concrete Composites* 25, 185-196., 2003.
- [42] Thuault, A, «*Approche multi-échelle de la structure et du comportement mécanique d'une fibre de lin*», (Thèse de doctorat). Université de Caen, Caen, France., 2011.
- [43] Minh Duc Ngo, «*Renforcement au cisaillement des poutres béton armé par matériaux composites naturels (fibre de Lin)*», *Matériaux composites et construction*. Université de Lyon. Français., 2016.
- [44] Page, J., Boutouil, M., Khadraoui, F., & Moussa, G, «*Etude des propriétés mécaniques d'un béton renforcé par des fibres de lin*», In *Conférence Internationale Francophone NoMaD, Mines Douai, France* (pp. 1-10)., 2015.
- [45] «AN815500.jpg (850×1170),» [En ligne]. Available: <https://algexpan.com/wp-content/uploads/2023/05/AN815500.jpg>. [Accès le 14 juin 2024].
- [46] «PRODUITS,» BISKRIA CIMENT, [En ligne]. Available: <https://grey.biskriaciment.com/produits/>. [Accès le 14 juin 2024].
- [47] B. Deepanraj, S. Thirumalvalavan, S. Selvarasu, N. Senthilkumar, et F. Shaik,, *Investigation and optimization of wear properties of flax fiber reinforced Delrin polymer composite*, *Materials Today: Proceedings*, mars 2023.
- [48] M. e. M.DREUX.
- [49] C. ROUGERON, «*Acoustique et Thermique*», Édition. Eyrolles, 1979.
- [50] O. HERIHIRI, «*Formulation et Caractérisation des Bétons Légers.* », PhD Thesis, Université Mohamed Khider-Biskra, 2010.
- [51] SIEBEL, E, “*Ductility of normal and lightweight concrete*”, Darmstadt Concrete.
- [52] Dupain R, Lanchan R, Saint-Arroman J C, “*Granulats, sols, ciment et bétons*”, Edition Casteilla .
- [53] Neville A M, «*Béton léger. Propriétés des bétons* », Eyrolles. Paris., 2000.