

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

FACULTE de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER en GENIE CIVIL

Spécialité Structure

Intitulé

**FORMULATION ET CARACTERISATION DES BETONS LEGERS
A BASE DE ROCHES NATURELLES**

Par

HADJI Hafsa & BELAIDI Ghizlene Nor El Houda

Le 29 juin 2025 devant le jury composé de

BENACHENHOU Kamila AMEL	Maitre de conférences A	Université de Tlemcen	Présidente
HOUTI Farid Brahim	Maitre-Assistant A	Université de Tlemcen	Examineur
TALEB Omar	Maitre de conférences A	Université de Tlemcen	Encadrant
MELOUKA Smain	Maitre-Assistant A	Université de Tlemcen	Encadrant

Année universitaire : 2024/2025

Dédicaces

Je rends tout d'abord grâce à Dieu le Tout-Puissant, source inépuisable de force et de persévérance, qui m'a permis d'achever ce travail dans les meilleures conditions.

Je tiens à dédier ce travail à toutes les personnes qui, par leur soutien moral, leurs encouragements ou leur bienveillance, ont contribué à la réalisation de ce projet :

- *À mes parents, Houria et Boumediene, pour leur amour inconditionnel, leurs prières discrètes, leur soutien constant et leur confiance indéfectible. Votre présence à mes côtés a été déterminante.*
- *À mes sœurs, Asma, Hanane et Hadjer, ainsi qu'à mes beaux-frères, Abdellatif et Amine, pour leurs encouragements, leur disponibilité et leur soutien moral tout au long de mon parcours.*
- *À l'ensemble de ma famille, pour leur affection, leurs conseils avisés et leur présence rassurante.*
- *À mon binôme et amie, Belaidi Ghizlene Nor El Houda, pour son professionnalisme, son sérieux et sa collaboration précieuse tout au long de ce travail.*
- *À mes amies, Kawter, Malek, Mounia, Sarah et à tous ceux qui m'ont soutenues dans les moments de doute ou de difficulté. Votre amitié et votre soutien ont été une réelle source de motivation.*

Enfin, à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont cru en moi et se sont investis pour la réussite de ce projet. Je vous suis profondément reconnaissante

Hadji Hafsa

Dédicaces

Avant tout, je rends grâce à Dieu le Tout-Puissant, source de force et de patience, qui m'a permis d'achever ce travail.

Je dédie ce projet à toutes celles et ceux qui ont été présents, de près ou de loin, dans cette belle aventure :

- *À mes parents, Maria et S. Mohammed, pour leur amour inconditionnel, leurs prières silencieuses, leur soutien sans faille et leur confiance en moi. Rien n'aurait été possible sans vous.*
- *À mes sœurs, Nouha, Souad et Inès, et mes beaux frères Younesse et Hamouda et ma chouchou sousou : merci pour vos encouragements, votre énergie positive et votre présence rassurante à chaque étape.*
- *À toute ma famille, pour vos mots, vos conseils et votre bienveillance constante.*
- *À mon binôme et amie, Hadji Hafsa : merci pour ton sérieux, ta rigueur et ta gentillesse. Travailler avec toi a été un vrai plaisir.*
- *À mes amies, Kawter, Marwa, Sabrine et Kawther, et tous les autres qui m'ont soutenue dans les moments de doute et de fatigue : votre présence a été une source de force.*
- *À tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à mon parcours et se sont investis pour que je réussisse. Merci du fond du cœur.*

Belaidi Ghizlene Nor El Houda

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire des Matériaux de Construction du Département de Génie Civil de l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen. Nous tenons à exprimer nos sincères reconnaissances aux responsables du laboratoire pour leur accueil et les moyens mis à notre disposition tout au long de cette étude.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Madame Benachenhou Kamila Amel, notre présidente de jury, ainsi qu'à Monsieur Houti Farid Brahim, examinateur, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre travail.

Nous remercions tout particulièrement Monsieur Taleb Omar et Monsieur Melouka Smain, nos encadrants, pour l'accompagnement rigoureux et bienveillant qu'ils nous ont apporté durant la préparation de ce projet. Leur disponibilité, leurs conseils avisés, la qualité de leur encadrement ainsi que la confiance qu'ils nous ont témoignée ont grandement contribué à la réalisation de ce travail, notamment dans les moments les plus exigeants de cette recherche.

Ainsi que tous les enseignants qui ont assuré notre formation durant nos années d'études. Et tous ceux qui ont contribué à ce travail de près ou de loin.

RESUME

Ce mémoire porte sur l'étude et la formulation d'un béton léger à base de diatomite, un matériau naturel siliceux, poreux et léger. L'objectif est de concevoir un béton plus respectueux de l'environnement, plus isolant et plus facile à mettre en œuvre, tout en restant suffisamment performant pour certaines applications. Le béton léger, grâce à sa faible densité, permet de réduire la charge sur les structures, ce qui le rend utile dans les projets de rénovation ou de construction sur des sols fragiles. L'intégration de la diatomite permet d'améliorer les propriétés thermiques du béton, mais soulève également des questions sur la perte de résistance mécanique liée à sa porosité. Pour pallier ce défaut, l'ajout de fibres de renforcement a été étudié afin d'améliorer la résistance à la traction et à la fissuration.

Les essais menés ont permis d'évaluer plusieurs formulations avec différents taux de diatomite et types de fibres. Les résultats ont montré une baisse progressive de la densité et une amélioration notable de l'isolation thermique, accompagnées d'une diminution de la résistance mécanique, surtout à forte teneur en diatomite. L'ajout de fibres améliore certains aspects mécaniques, mais leur efficacité reste limitée si le béton est trop poreux. En conclusion, la diatomite représente un ajout intéressant dans la production de bétons légers pour des usages non structurels ou faiblement sollicités. Le mémoire propose également des pistes pour approfondir les recherches, notamment sur l'optimisation des dosages, l'association avec d'autres matériaux écologiques, et les tests en conditions réelles.

Mots clés : Béton léger, diatomite, matériaux, fibre, densité, résistance mécanique, MEB, rhéologie.

ABSTRACT

This thesis focuses on the study and formulation of lightweight concrete using diatomite, a natural, siliceous, porous, and lightweight material. The goal is to develop a more environmentally friendly, better insulating, and easier-to-handle concrete that still offers sufficient performance for specific applications. Lightweight concrete, due to its low density, helps reduce structural loads, making it particularly useful for renovation projects or construction on weak soils. Incorporating diatomite improves the thermal properties of concrete but raises concerns about mechanical strength loss due to its porosity. To address this issue, reinforcement fibers were added to enhance tensile strength and crack resistance.

The tests carried out evaluated several formulations with varying diatomite content and types of fibers. Results showed a gradual decrease in density and a notable improvement in thermal insulation, along with a reduction in mechanical strength, especially with high diatomite content. The addition of fibers improved certain mechanical properties, but their effectiveness remained limited in highly porous concrete. In conclusion, diatomite proves to be a promising addition in producing lightweight concrete for non-structural or lightly loaded applications. The thesis also outlines future research directions, including optimizing the mix design, combining diatomite with other eco-friendly materials, and conducting tests under real-life conditions.

Keywords : Lightweight concrete, diatomite, materials, fiber, density, mechanical strength, SEM, rheology.

ملخص

يركز هذا البحث على دراسة وتصميم خرسانة خفيفة الوزن باستخدام الدياتوميت، وهي مادة طبيعية سيليسية، مسامية وخفيفة. الهدف هو تطوير مادة خرسانية أكثر صداقة للبيئة، وتتمتع بخصائص عزل حراري أفضل، وسهولة التطبيق، مع الحفاظ على مستوى مقبول من الأداء في بعض الاستخدامات. تساهم الخرسانة الخفيفة، بفضل كثافتها المنخفضة، في تقليل الأحمال على الهياكل، مما يجعلها مناسبة بشكل خاص لمشاريع الترميم أو البناء على التربة الضعيفة. يساهم دمج الدياتوميت في تحسين الخصائص الحرارية للخرسانة، لكن ذلك يثير تساؤلات حول انخفاض مقاومتها الميكانيكية بسبب مساميتها العالية. وللتغلب على هذا النقص، تمت إضافة ألياف تسليح لتحسين مقاومة الشد والتشقق

شملت التجارب تقييم عدة تركيبات بنسب مختلفة من الدياتوميت وأنواع متعددة من الألياف. وقد أظهرت النتائج انخفاضاً تدريجياً في الكثافة وتحسناً ملحوظاً في العزل الحراري، إلى جانب تراجع في المقاومة الميكانيكية، خاصة عند زيادة نسبة الدياتوميت. ساهمت الألياف في تحسين بعض الخصائص الميكانيكية، لكن فعاليتها بقيت محدودة في الخرسانة ذات المسامية العالية. في الختام، تُعد الدياتوميت مادة واعدة في إنتاج الخرسانة الخفيفة المخصصة للاستعمالات غير الإنشائية أو ذات الأحمال المنخفضة. كما يقترح هذا البحث توجهات مستقبلية، منها تحسين تصميم الخلطات، ودمج الدياتوميت مع مواد صديقة للبيئة، وإجراء اختبارات في ظروف تطبيق واقعية

الخرسانة خفيفة الوزن، الدياتوميت، المواد، الألياف، الكثافة، المقاومة الميكانيكية، المجهر الإلكتروني: **الكلمات المفتاحية**

، السلوك الريولوجي (SEM) الماسح

TABLE DES MATIERES

INTRODUCION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES BETONS LEGERES ET LES BETONS FIBRES	
1.1 INTRODUCTION	4
1.2 BETON LEGER	4
1.2.1 Généralités	4
1.2.2 Types de béton léger	6
1.2.3 Classification des bétons légers	10
1.3 BETONS FIBRES	11
1.3.1 Généralités	11
1.3.2 Types de fibres utilisées dans le béton	12
1.4 CONCLUSION	14
CHAPITRE 2 : LA DIATOMITE DANS LA CONSTRUCTION : ETAT DE L'ART	
2.1 INTRODUCTION	16
2.2 DIATOMITE	16
2.2.1 La diatomite et son origine	16
2.2.2 Béton et mortier à base de diatomite	17
2.2.3 Domaine d'utilisation	18
2.2.4 Diatomite et matériaux associés : propriétés	18
2.2.5 Avantages et inconvénients du beton base de diatomite	26
2.3 CONCLUSION	27
CHAPITRE 3 : MATERIAUX, FORMULATION ET CARACTERISATION DU BETON	
3.1 INTRODUCTION	29
3.2 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES	29
3.2.1 Ciment	29
3.2.2 Adjuvant	30
3.2.3 Sables et graviers	31
3.2.4 Diatomite	33
3.2.5 Analyse granulométrique	35

3.3 FORMULATION DU BETON	37
3.3.1 Formulation du béton ordinaire	37
3.3.2 Formulation du béton à base de diatomite	38
3.3.3 Formulation du béton fibré à base de diatomite.....	Erreur ! Signet non défini.
3.4 FORMULATION D'UN MORTIER EQUIVALENT BETON	40
3.5 CONCLUSION	45
CHAPITRE 4 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS	
4.1 INTRODUCTION	48
4.2 CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES	48
4.2.1 Ouvrabilité.....	48
4.2.2 Essai rhéologique	50
4.3 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES	55
4.3.1 Densité.....	55
4.3.2 Analyse microstructurale	56
4.4 CARACTERISTIQUES MECANIQUES	58
4.4.1 Résistance à la compression	58
4.4.2 Résistance à la flexion	60
4.4.3 Essai ultrason.....	63
4.5 CONCLUSION	64
CONCLUSION GENERALE	65

LISTE DES TABLEAUX

Titre du tableau	Page
Tableau 1.1 Classification des bétons légers en fonction de la densité	11
Tableau 1.2 Classification des bétons légers en fonction de la densité	11
Tableau 3.1 Propriétés physiques du ciment	29
Tableau 3.2 Résistance à la compression de ciment	29
Tableau 3.3 Composition chimique du ciment	30
Tableau 3.4 Composition minéralogique du clinker de ciment	30
Tableau 3.5 Masses volumiques apparentes des granulats	31
Tableau 3.6 Masse volumiques absolues des granulats (Méthode de l'éprouvette)	31
Tableau 3.7 Masses volumiques absolues du sable et des graviers (Méthode du ballon)	32
Tableau 3.8 Masses volumiques apparentes des granulats de diatomite	33
Tableau 3.9 Masses volumiques apparentes des granulats de diatomite (Méthode du ballon)	33
Tableau 3.10 Masses volumiques apparentes des granulats de diatomite (Méthode de l'éprouvette)	33
Tableau 3.11 Pourcentage d'absorption d'eau de la diatomite	35
Masses volumiques apparentes des granulats de diatomite	
Tableau 3.12 Densités et quantités des constituants pour 1 m ³ de béton ordinaire	38
Tableau 3.13 Quantités des constituants pour 1m ³ de béton diatomite	38
Tableau 3.14 Quantités des constituants pour 1m ³ de béton fibré	40
Tableau 3.15 Caractéristiques des gravillons du béton	41
Tableau 3.16 Surface développée du sable ordinaire	43
Tableau 3.17 Surface développée du gravier ordinaire 4/8	44
Tableau 3.18 Surface développée du gravier ordinaire 8/16	44
Tableau 3.19 Surface développée du sable diatomite	44
Tableau 3.20 Surface développée du gravier diatomite 4/8	44
Tableau 3.21 Surface développée du gravier diatomite 8/16	45
Tableau 3.22 Quantités des constituants pour 1m ³ de mortier équivalent béton	45
Tableau 4.1 Affaissement au cône d'Abrams du béton fibré léger à base de diatomite	49
Tableau 4.2 Affaissement au cône d'Abrams du béton léger à base de diatomite	49
Tableau 4.3 Densité des différents types de bétons de diatomite formulés	55
Tableau 4.4 Résistance à la compression à 28 jours du béton léger à base de diatomite	58
Tableau 4.5 Résistance à la compression à 28 jours du béton fibré léger à base de diatomite	58

Tableau 4.6 Résistance à la flexion à 28 jours du béton léger à base de diatomite	60
Tableau 4.7 Résistance à la flexion à 28 jours du béton fibré léger à base de diatomite	60
Tableau 4.8 Mesures à l'ultrason du béton léger à base de diatomite	62
Tableau 4.9 Mesures à l'ultrason du béton léger à base de diatomite fibré	62

LISTE DES FIGURES

Titre de la figure	Page
Figure 1.1 Extension du gymnase du Westport high school à lansa city (1922)	05
Figure 1.2 Pont Dyckerhoff (Allemagne)	05
Figure 1.3 Béton caverneux	07
Figure 1.4 Béton cellulaire et mousse	07
Figure 1.5 Granulats légers	08
Figure 1.6 Remblai allegé en granulats de verre recyclés pour constructions	08
Figure 1.7 Mélange de granulats naturels légers	09
Figure 1.8 La pouzzolane	09
Figure 1.9 Pierre de ponce	10
Figure 1.10 Roche de diatomite	10
Figure 1.11 Les micro-fibres	12
Figure 1.12 Fibres macro-synthétiques	13
Figure 1.13 Fibres métalliques	14
Figure 2.1 Les zones de diatomite en Algérie	16
Figure 2.2 Granulats de diatomite	18
Figure 2.3 Absorption d'eau de mortier incorporé avec différentes quantités de diatomite	20
Figure 2.4 Résistance à la compression du mortier de ciment à base de diatomite et fumée de silice	23
Figure 2.5 Variation de la résistance à la compression et la flexion des échantillons soumis aux cycles gel-dégel	24
Figure 2.6 Appareil ultrason	25
Figure 3.1 Masse volumique (Méthode de l'éprouvette)	32
Figure 3.2 Masse volumique (Méthode du ballon)	32
Figure 3.3 Masse volumique apparente	34
Figure 3.4 La diatomite au microscope électronique à balayage	34
Figure 3.5 Essai de tamisage	36
Figure 3.6 Courbes granulométriques des différentes classes et différents matériaux	36
Figure 3.7 Moules cylindriques et prismatiques	39
Figure 3.8 Fibres OCR à l'œil nu et au microscope électronique	40
Figure 4.1 Essai d'ouvrabilité au cône d'Abrams	48
Figure 4.2 Affaissement au cône d'Abrams	48
Figure 4.3 Le rhéomètre	49
Figure 4.4 Courbe représente vitesse de rotation et couple	50
Figure 4.5 Relation entre la vitesse et le couple de cisaillement	51

Figure 4.6 Relation entre le taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement et la contrainte de cisaillement des MBE	51
Figure 4.7 Courbe représente le seuil et la viscosité de béton diatomite	52
Figure 4.8 Courbe représente le seuil et la viscosité de béton diatomite fibré	53
Figure 4.9 Densité des différents types de bétons	54
Figure 4.10 Microstructure du béton ordinaire ($\times 200$, $\times 500$)	55
Figure 4.11 Microstructure du béton diatomite 100% ($\times 200$, $\times 500$)	55
Figure 4.12 Microstructure du béton ordinaire et fibré ($\times 500$)	55
Figure 4.13 Essai de compression	56
Figure 4.14 Résistance à la compression à 28 jours pour différents types de béton	57
Figure 4.15 Aspect des éprouvettes suite à l'essai de compression	58
Figure 4.16 Essai de flexion	59
Figure 4.17 Résistance à la flexion	59
Figure 4.18 Aspect des éprouvettes suite à l'essai de flexion	60
Figure 4.19 Vitesse de propagation des ondes pour différentes formulations	61

LISTE DES ABREVIATIONS

kg : Kilogramme

g : Gramme

m³ : Mètre au cube

CO₂ : Dioxyde de carbone

J.-C : Jésus- Christ

t /m³ : Tonnes par mètre cube

mm : Millimètre

cm : centimètre

CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

°C : Degré Celsius

MPa : Méga pascal

MEB : microscope électronique à balayage

W : Watt

kJ : Kilo joule

Min : minute

BO : béton ordinaire

BD : béton diatomite

BDF : béton diatomite fibré

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est un matériau de construction composite fabriqué à partir d'un mélange de ciment (ou liant hydraulique), d'eau, de granulats (sable, gravillons) et parfois d'adjuvants. Il durcit en séchant et sert à construire car il est solide, étanche, isolant et peut prendre n'importe quelle forme.

Le béton léger est un type de béton dont la densité est inférieure à celle du béton traditionnel, généralement inférieure à 2000 kg/m³. Il est obtenu en utilisant des granulats légers ou en incorporant des agents moussants. Ce béton permet de réduire le poids des structures tout en offrant de bonnes performances en isolation thermique et acoustique. Il est souvent utilisé pour des éléments non porteurs, l'isolation, ou dans des constructions où la réduction de charge est essentielle. Il est utilisé pour alléger les constructions, isoler, rénover des planchers, faire des murs, des toits, ou remplir des vides en génie civil.

Le béton léger en Algérie est un matériau prometteur, encore peu répandu mais avec un potentiel important pour répondre aux besoins spécifiques du climat et des sols locaux, grâce à l'utilisation de granulats légers naturels et innovants, possédant de bonnes isolations thermiques, très utiles pour la construction dans les villes chaudes du sud algérien et dans certaines villes chaudes du nord [1].

Parmi ces bétons légers on distingue celui à base de diatomées qui est un béton où les granulats sont partiellement substitués par un matériau naturel siliceux (diatomite). Cette dernière améliore certaines performances écologiques en permettant de réduire les émissions de CO₂, d'améliorer l'isolation thermique des ouvrages et de contribuer à la qualité de l'air intérieur, tout en offrant une bonne recyclabilité et un faible impact en fin de vie. Cependant, l'allègement du béton entraîne souvent une diminution de ses performances mécaniques. Ainsi, un certain nombre de questions nous viennent à l'esprit, à savoir :

- Quel est l'impact de l'ajout de diatomite sur les propriétés mécaniques du béton (résistance à la compression, traction, flexion) ?
- Existe-t-il un seuil critique de substitution au-delà duquel les performances mécaniques deviennent inacceptables ?
- La substitution des granulats a-t-elle un effet sur l'ouvrabilité du béton frais ?

Étant donné que les bétons légers ont souvent une résistance mécanique réduite, l'introduction de fibres apparaît comme une piste prometteuse pour améliorer leurs performances, notamment en augmentant la résistance à la traction et la résistance à la fissuration. Dans notre cas, est-ce

que l'ajout des fibres va-t-il permettre de compenser une éventuelle perte de résistance liée à l'utilisation de granulats de diatomite ?

Pour répondre à ces problématiques, un plan de recherche a été établi et présenté dans ce mémoire en quatre parties principales : La première introduit les bétons légers et les bétons fibrés, en mettant en lumière leurs propriétés, leurs domaines d'application, ainsi que les motivations de leur utilisation croissante. La deuxième partie propose un état de l'art sur la diatomite, matériau naturel, léger et poreux, en soulignant ses caractéristiques et ses usages potentiels dans le secteur du bâtiment. La troisième partie décrit les matériaux employés dans la formulation des bétons, notamment la diatomite et les fibres, et présente les méthodes de caractérisation appliquées, telles que les tests de résistance ou de densité. Enfin, la dernière partie analyse les résultats expérimentaux, les compare selon les différentes formulations, et en tire des conclusions sur l'impact de la diatomite sur les performances globales du béton.

Ce mémoire se conclut par une synthèse générale mettant en lumière les principaux résultats et proposant des recommandations pour les travaux futurs.

Chapitre **1**

GENERALITES SUR LES BETONS LEGERS ET LES BETONS FIBRES

1.1 INTRODUCTION

Le béton est un matériau largement reconnu pour sa résistance et sa rigidité, deux propriétés essentielles à la stabilité des structures. Toutefois, il présente certains inconvénients, notamment sa masse élevée, qui peut affecter la répartition des charges dans l'ouvrage. Pour répondre à ces limites, le béton léger a été développé. Ce matériau, alliant légèreté et rigidité, est particulièrement adapté aux éléments non porteurs dans les bâtiments.

Afin d'améliorer sa cohésion, sa résistance à la traction et à la flexion, et de limiter la fissuration, des fibres ont été ajoutées à certaines formulations. Cela permet d'augmenter la ductilité du matériau et d'en améliorer les performances mécaniques globales.

Dans ce chapitre, nous allons tenter de répondre à plusieurs questions fondamentales :

- Qu'est-ce que le béton léger de manière générale ?
- Comment est-il fabriqué à partir de granulats légers ?
- Quels sont les différents types de granulats utilisés ?
- En quoi consiste le béton fibré ?

Pour y répondre, nous expliquerons d'abord les critères qui définissent un béton dit « léger », puis nous présenterons les types de granulats utilisés dans sa fabrication. Ensuite, nous aborderons le concept de béton fibré, et illustrerons le tout par des exemples concrets d'applications du béton léger dans le domaine de la construction.

1.2 BETON LEGER

1.2.1 GENERALITES

Les bétons légers ne sont pas une avancée technologique moderne. Connus depuis l'Antiquité, ils sont les précurseurs du béton actuel. Les premières références européennes en matière de béton léger remontent à deux mille ans, au début de l'Empire romain. Le Panthéon de Rome, en Italie, fut construit vers 128 après J.-C. et peut être cité comme l'un des exemples les plus connus. Il a émerveillé les ingénieurs de diverses disciplines pendant des siècles et a démontré de manière impressionnante l'utilisation systématique de divers granulats légers naturels dans l'opus caementitium [2]. Après l'effondrement de l'Empire romain, l'utilisation du béton léger a été limitée en raison de la faible disponibilité et de la variabilité des granulats volcaniques naturels. Le développement et la production de granulats légers industriels aux XIXe et XXe siècles ont marqué un tournant historique pour la technologie des matériaux [3, 4], Au cours

des années 1920, plusieurs ponts ont été construits en utilisant de l'ardoise expansée comme granulats dans du béton léger. Cinquante ans plus tard, plus de 200 ponts en béton léger ont été construits aux États-Unis et au Canada [5].



Figure 1.1 Extension du gymnase du Westport High School à Lansa City (1922)[60]

Depuis les années 1990, la réglementation technique relative à la construction en béton en Allemagne a été révisée. L'utilisation des bétons légers a connu un essor grâce à ces nouvelles réglementations et aux progrès technologiques et scientifiques. Cependant, le nombre d'exemples réalisés est resté relativement faible. Les développements récents visent à réduire encore la densité du béton, tout en maintenant une résistance suffisante et aussi élevée que possible. Ces dernières années, les structures monolithiques en béton léger apparent, dans les classes de résistance et de densités les plus basses, ont gagné en popularité en Europe. Ces structures permettent la construction d'un mur fini en une seule opération et évitent ainsi le recours à des structures multicouches [6].



Figure 1.2 Pont Dyckerhoff (Allemagne) [61]

Les bétons légers possédant de bonnes isolations thermiques, très utiles pour la construction dans les villes chaudes du sud algérien et dans certaines villes chaudes du nord tels que Guelma et Chlef.

Le béton léger en Algérie est un matériau prometteur, encore peu répandu mais avec un potentiel important pour répondre aux besoins spécifiques du climat et des sols locaux, grâce à l'utilisation de granulats légers naturels et innovants.

Les bétons légers sont très utilisés pour construire des structures plus légères, pour la rénovation des bâtiments, et aussi pour leurs bonnes performances en isolation thermique et acoustique. Leur densité est comprise entre 0,8 et 2 tonnes par mètre cube, alors que celle du béton classique est de 2,2 à 2,4 t /m³.

Il existe trois méthodes principales pour rendre le béton plus léger. La première consiste à utiliser des granulats légers comme la pouzzolane naturelle, la diatomite ou le polystyrène, à la place des matériaux plus lourds. La deuxième méthode consiste à créer des vides dans le béton, par exemple en mettant moins de sable ou en le rendant poreux, comme c'est le cas du béton drainant. Enfin, on peut aussi ajouter de l'air ou du gaz dans le mélange, ce qui donne des bétons comme le béton mousse ou le béton cellulaire.

1.2.2 TYPES DE BETON LEGER

Il existe trois grandes familles de bétons légers :

1.2.2.1 Béton caverneux

C'est un béton drainant de ciment à structure ouverte permettant l'infiltration de l'eau de pluie. Le nom de ce béton provient des vides qu'il contient et qui ressemblent à des cavernes. Ces vides ont une ouverture allant de 10 à 30 mm [7].



Figure 1.3 Béton caverneux[62]

1.2.2.2 Béton mousse ou cellulaire

On y ajoute des produits spéciaux qui forment de petites bulles d'air dans le ciment. Ce béton est très léger et offre une bonne isolation thermique et acoustique, il contient des tensioactifs qui lors de sa fabrication par malaxage provoquent la formation d'une grande quantité de bulles d'air de taille régulière, stables et bien dispersées [8].



Figure 1.4 Béton cellulaire et mousse[63]

1.2.2.3 Béton de granulats légers

Le béton des granulats léger est connu depuis les périodes antiques. C'est donc un matériau polyvalent, utilisé pour ses qualités d'allègement et d'isolation, tout en répondant à des normes spécifiques (notamment NF EN 206) [9].

Il est fabriqué en remplaçant les granulats classiques (sable, gravier) par des matériaux plus légers comme la diatomite, pouzzolane naturelle, etc., c'est la méthode la plus courante. Il contient un pourcentage volumique important induisant une masse volumique inférieure à celle d'un béton normal [10]. Ce sont des matériaux granulaires utilisés principalement pour alléger les bétons et améliorer leurs propriétés thermiques ou acoustiques. Ils se distinguent des

granulats ordinaires par leur faible densité, généralement inférieure à 2000 kg/m^3 , ce qui permet de réduire le poids des structures tout en conservant une résistance mécanique acceptable.



Figure 1.5 Granulats légers[52]

a. PRINCIPAUX TYPES PRINCIPAUX DE GRANULATS

On distingue trois grandes catégories de granulats légers selon leur origine :

- **Granulats artificiels**

Fabriqués par traitement thermique de matières premières comme l'argile (argile expansée), le schiste, ou des sous-produits industriels comme les cendres volantes et les scories de haut fourneau. Ces granulats sont souvent sphériques, poreux et légers.

- **Granulats recyclés**

Issus de matériaux tels que le polystyrène expansé, le verre recyclé expansé, ou encore des plastiques et caoutchoucs broyés, de plus en plus utilisés dans une démarche de développement durable.



Figure 1.6 Remblai allégé en granulats de verre recyclés pour constructions [64]

- **Granulats d'origine naturelle**

Comme la pierre ponce, la perlite, la vermiculite ou la pouzzolane, qui sont issus de roches volcaniques naturellement poreuses et expansées, et la diatomite qui est une roche sédimentaire siliceuse.



Figure 1.7 Mélange de granulats naturels légers [52]

a) La Pouzzolane

Roche volcanique naturelle Origine : Formée par les projections volcaniques, notamment de lave basaltique, lors d'éruptions explosives. Structure : Très alvéolaire (pleine de petites cavités), ce qui lui confère légèreté et porosité.

Couleurs : Majoritairement rouge (oxydation du fer), Noire (forme plus fraîche ou riche en fer), Parfois grise, mais c'est rare [11].



Figure 1.8 La pouzzolane [65]

b) La pierre ponce

La pierre ponce (ou simplement ponce) est une roche volcanique très poreuse et légère, au point qu'elle peut flotter sur l'eau. Elle fait partie des éjectas volcaniques, c'est-à-dire des fragments de lave projetés lors d'éruptions [11].



Figure 1.9 Pierre de ponce [11]

c) La diatomite

La diatomite est une roche sédimentaire siliceuse, claire, légère, poreuse et friable, constituée essentiellement des squelettes fossilisés d'algues unicellulaires appelées diatomées. Elle est aussi appelée "terre de diatomées", "kieselguhr" ou "farine fossile". [12]



Figure 1.10 Roche de diatomite

1.2.3 CLASSIFICATION DES BETONS LEGERS

Un béton léger se caractérise principalement par **deux propriétés fondamentales**, dont dépendent toutes les autres données nécessaires au dimensionnement et au calcul. Il s'agit :

- De la **masse volumique sèche**, notée γ_{bs} ;
- De la **résistance à la compression à 28 jours**.

Selon la norme **EN 206**, les bétons légers sont répartis en **six catégories** de densité, en fonction de leur **masse volumique exprimée en kg/m³** [13].

Classe de densité	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Kg/m ³	901 à 1000	1001 à 1200 à	1201 à 1400	1401 à 1600	1601 à 1800	1801 à 2000

Tableau 1.1 Classification des bétons légers en fonction de la densité [14]

Dans sa nouvelle version, la norme EN 206 définit des catégories de bétons légers selon des intervalles de masse volumique précisés dans le tableau ci-après:

Classe de masses volumiques	LC 1,0	LC 1,2	LC1,4	LC1,6	LC1,8	LC2,0
Kg/m ³	>800 et ≤1000	>1000 et ≤1200	>1200 et ≤1400	>1400 et ≤1600	>1600 et ≤1800	>1800 et ≤2100

Tableau 1.2 Classification des bétons légers en fonction de la densité [15]

1.3 BETONS FIBRES

1.3.1 GENERALITES

L'idée de renforcer le béton avec des fibres existe depuis longtemps. Déjà dans l'Antiquité, les Égyptiens mettaient de la paille dans la boue pour rendre les briques plus solides. Au début du 20e siècle, des chercheurs ont commencé à tester l'ajout de petites fibres, surtout en acier, pour rendre le béton plus résistant. En 1910, un certain J. Porter a montré que ces fibres rendaient le béton plus fort, surtout contre la traction et l'écrasement. Après cela, plusieurs inventions ont été enregistrées aux États-Unis et en Europe pour utiliser des fibres métalliques dans le béton. Depuis les années 1940, ces méthodes ont beaucoup évolué et ont permis de créer les bétons fibrés que l'on utilise aujourd'hui [16], Les techniques pour fabriquer du béton léger avec des fibres sont assez nouvelles en Algérie. Mais elles s'appuient sur des méthodes traditionnelles et sur le développement de l'industrie depuis les années 1970. Aujourd'hui, les chercheurs et

les entreprises locales s'intéressent de plus en plus aux fibres synthétiques pour améliorer ce type de béton.

C'est un béton dans lequel des fibres sont incorporées pour améliorer ses performances mécaniques, notamment la résistance à la traction, la ductilité, et la réduction de la fissuration. Ces fibres sont dispersées uniformément dans la masse du béton, ce qui permet un renforcement multidirectionnel et homogène sans recourir systématiquement aux armatures traditionnelles [17, 18].

1.3.2 TYPES DE FIBRES UTILISEE DANS LE BETON

a) Les micro-fibres synthétiques (non structurelles)

Les micro-fibres synthétiques sont obtenues par extrusion de polypropylène. Bien qu'elles ne soient pas porteuses, elles offrent de nombreux avantages dans les applications béton :

Réduction de la fissuration : elles limitent l'apparition des microfissures dues au retrait plastique en phase jeune du béton.

Amélioration de la durabilité : elles augmentent la résistance du béton aux chocs, à l'abrasion et réduisent les risques d'éclats ou de fers apparents lors du décoffrage.

Substitution aux treillis soudés : dans le cas de dallages, elles permettent de se passer du treillis anti-fissuration, ce qui réduit le temps de mise en œuvre et diminue la pénibilité sur chantier.

Usage décoratif : elles sont également utilisées dans les bétons décoratifs, notamment les bétons désactivés, où elles jouent un rôle protecteur de surface [19].



Figure 1.11 Les microfibrés [19]

b) Les fibres macro-synthétiques structurelles

Les fibres macro-synthétiques structurelles sont fabriquées à partir d'un mélange de polypropylène et de polyéthylène. Elles sont conçues pour réduire la fissuration du béton et améliorer sa ductilité, c'est-à-dire sa capacité à se déformer sans se rompre brutalement. Elles sont couramment utilisées dans les dallages intérieurs et extérieurs, ainsi que dans les chapes, où elles peuvent renforcer le béton de manière efficace. Dans certains cas, ces fibres peuvent remplacer le ferrailage traditionnel, sous réserve de l'avis favorable du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). Leur grande capacité d'élongation permet d'absorber les déformations tout en conservant l'intégrité structurelle du béton [19].



Figure 1.12 Fibres macro-synthétiques [19]

]]

c) Les fibres métalliques (structurelles)

Les fibres métalliques sont utilisées pour améliorer le comportement mécanique du béton structurel. Leur mode d'action est similaire à celui des armatures métalliques (comme les treillis soudés) dans le béton armé, en contribuant à la reprise des efforts et à la limitation des fissures. Elles sont particulièrement adaptées pour les dallages soumis à des sollicitations mécaniques importantes, comme ceux des zones industrielles ou logistiques [19].



Figure 1.13 Fibres métalliques [19]

1.4 CONCLUSION

À partir de ce chapitre, on peut conclure que le béton léger est un bon choix parce qu'il pèse moins que le béton normal. Grâce à sa masse réduite, cela permet de diminuer les charges sur la structure, ce qui en fait une solution particulièrement adaptée aux projets de rénovation de constructions anciennes. Il ne faut pas oublier les fibres, qui aident à réduire les fissures et à améliorer la durabilité du béton grâce à leurs différents types. Un autre élément intéressant est l'utilisation de la diatomite, un matériau naturel aux propriétés poreuses. Son intégration dans le béton léger permet non seulement de réduire encore davantage la densité du mélange, mais aussi d'améliorer ses performances en termes d'isolation thermique et de longévité.

Chapitre **2**

LA DIATOMITE DANS LA CONSTRUCTION : ETAT DE L'ART

2.1 INTRODUCTION

Au cours du chapitre précédent, nous avons découvert ce qu'est un béton léger, ainsi que les éléments qui peuvent contribuer à alléger sa masse. Un béton léger, comme son nom l'indique, se distingue principalement par un poids inférieur à celui d'un béton traditionnel. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons plus particulièrement au béton léger à base de diatomite.

Mais avant d'en étudier les propriétés, il est essentiel de comprendre ce qu'est la diatomite. Il s'agit d'une roche sédimentaire siliceuse, légère et poreuse, formée par l'accumulation de microfossiles d'algues unicellulaires appelées diatomées. Grâce à sa faible densité, sa porosité élevée et sa capacité d'isolation thermique, la diatomite est un excellent composant pour la fabrication de bétons allégés. Nous allons donc découvrir les propriétés physiques et mécaniques du béton fabriqué avec de la diatomite.

2.2 DIATOMITE

2.2.1 LA DIATOMITE ET SON ORIGINE

En 2013, 2,15 millions de tonnes de diatomites ont été produits dans le monde [20]. Les Etats Unis sont les plus gros producteurs, la diatomite en Algérie se situe dans la région ouest comme Tlemcen (Noumène), Mostaganem (Abdelmalek Redamne), Mascara (Secteurs ChadliTahalit).

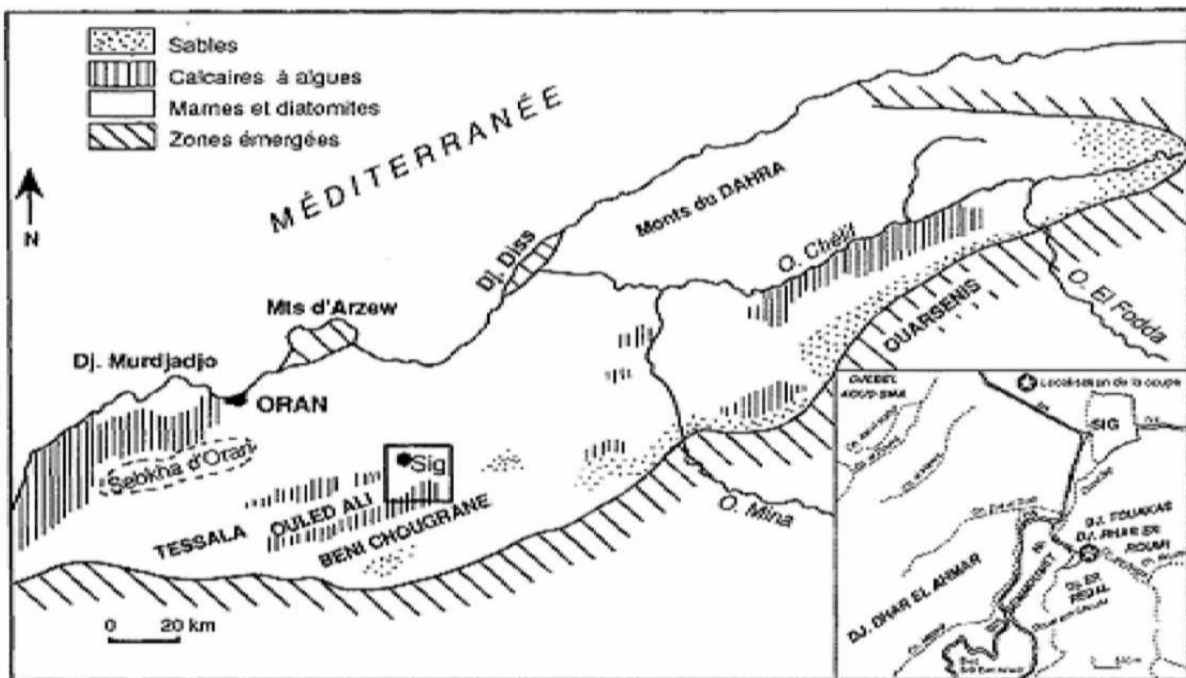


Figure 2.1 Les zones de diatomite en Algérie

La diatomite, aussi appelée kieselguhr, est une roche sédimentaire claire et légère, formée par l'accumulation dans l'anciens lacs des carapaces fossilisées de diatomées, qui sont des algues unicellulaires possédant un squelette siliceux amorphe. Ce matériau naturel, abondant en Algérie, est constitué principalement de silice amorphe, avec des impuretés telles que des composés organiques, du sable, de l'argile, des carbonates de calcium et de magnésium, ainsi que des sels. La diatomite est très poreuse et friable, ce qui lui confère des propriétés intéressantes pour diverses applications industrielles et scientifiques. Elle porte aussi plusieurs noms comme farine fossile, terre d'infusoire, tripoli ou farine de diatomée [21]. Elle est utilisée aussi dans la fabrication de la bière pour sa filtration environ 0,5 g de diatomite sont nécessaires pour filtrer un demi-litre de bière [22].

2.2.2 BETON ET MORTIER A BASE DE DIATOMITE

Le béton de diatomite est un matériau de construction léger et performant grâce à l'utilisation de la diatomite, une roche siliceuse très poreuse et légère (masse volumique entre 200 et 300 kg/m³), ce qui permet d'obtenir un béton avec une densité inférieure à 2000 kg/m³, bien plus léger que le béton traditionnel. Ses caractéristiques principales sont :

- Composition : mélange de granulats (sable, gravier), liant hydraulique ou hydrocarboné, avec ajout de diatomite pour alléger le béton [23].
- Légèreté : la faible densité de la diatomite réduit considérablement le poids du béton, utile pour les constructions à haute portée ou nécessitant un allègement structurel [23].
- Résistance mécanique : la diatomite est très peu résistante comparée à d'autres roches, elle peut être facilement effritée à la main à l'état sec [24].
- Traitement : la diatomite peut être calcinée à 400-500°C pour optimiser ses propriétés, notamment sa réactivité pouzzolanique qui contribue à la résistance [25].
- Fonctionnement : elle agit comme un filler et améliore la structure granulaire, tout en apportant une meilleure résistance à la corrosion et aux hautes températures.
- Isolation thermique : grâce à sa porosité, le béton de diatomite offre aussi une bonne isolation thermique, ce qui est un avantage pour le confort des bâtiments.
- Applications : utilisé dans les constructions légères, les structures porteuses, et les matériaux de parois légers, où la combinaison légèreté-résistance est cruciale.

En résumé, le béton de diatomite combine légèreté, haute résistance mécanique, isolation thermique et durabilité, tout en permettant de réduire la quantité de ciment nécessaire, améliorant ainsi la qualité et la performance globale du béton.



Figure 2.2 Granulats de diatomite

2.2.3 DOMAINE D'UTILISATION

Les domaines d'utilisation du béton à base de diatomite en génie civil incluent :

- Bétons légers pour construction avec amélioration thermique et acoustique.
- Additif pouzzolanique dans le ciment pour durabilité et résistance mécanique.
- Matériaux réfractaires et isolants thermiques.
- Peintures réfractaires pour protection au feu.
- Structures nécessitant légèreté et isolation (ex. conduits, cheminées) [23].

2.2.4 DIATOMITE ET MATERIAUX ASSOCIES : PROPRIETES

a. Caractéristiques physiques

- *Masse volumique*

Dans le cas d'un béton léger à base de diatomite, la masse volumique a une définition peu spéciale, il se distingue par trois définitions de masse volumique selon son état d'humidité, la masse volumique à l'état frais, la masse volumique à l'état séché à l'air et la masse volumique à l'état séché au four.

- Masse volumique à l'état frais : Correspond au poids du béton immédiatement après malaxage, incluant l'eau de gâchage. Elle se calcule par la formule classique, où la masse inclut tous les constituants avant séchage. Cette valeur est temporaire et dépend fortement de la teneur en eau initiale.
- Masse volumique à l'état séché à l'air : Mesurée après évaporation naturelle de l'humidité libre en conditions ambiantes. Pour les bétons légers, cette valeur excède généralement de

50 kg/m³ la masse volumique séchée à l'étuve, en raison de la rétention d'eau résiduelle dans les pores. Les granulats légers limitent les échanges hydriques grâce à leur structure alvéolaire.

- Masse volumique à l'état séché au four : Obtenue après dessiccation complète à 105°C, elle représente la masse volumique absolue du matériau déshydraté. C'est la référence normative (NF EN 206+A2/CN) pour classer les bétons légers (800-2000 kg/m³).

La masse volumique du béton fraîchement malaxé correspond à sa densité à l'état frais ce qui permet une mesure simple et directe. Au cours du séchage à l'air le béton perd progressivement son humidité jusqu'à ce qu'elle atteigne une masse volumique à l'état séché à l'air le béton séché à une température 105°C il atteint alors sa masse volumique à l'état séché au four, représentant la densité minimale une fois toute l'humidité éliminée.

La masse volumique du béton léger est une mesure de la densité de ce matériau spécifique. Elle correspond à la quantité de masse contenue dans un volume donné de béton léger.

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

La masse volumique du béton léger à base de diatomite est généralement inférieure à celle du béton traditionnel, ce qui signifie que le béton léger est moins dense. Cette caractéristique est obtenue en utilisant des granulats légers, tels que des granulats d'argile expansée, de la perlite ou de la vermiculite, qui ont une masse volumique inférieure à celle des granulats traditionnels comme le sable et le gravier. La masse volumique du béton léger est exprimée en kilogrammes par mètre cube (kg/m³) et peut varier en fonction de la formulation spécifique du béton léger utilisé.

La diatomite, en raison de sa structure poreuse et de sa faible densité, est largement utilisée comme adjuvant dans la formulation de bétons allégés. En comparaison avec le béton classique dont la densité se situe entre 2200 et 2400 kg/m³, l'incorporation de diatomite permet d'obtenir des bétons allégés dont la densité varie généralement entre 1400 et 1900 kg/m³. Lorsque la teneur en diatomite est plus élevée, on peut même atteindre des densités plus faibles, comprises entre 1000 et 1400 kg/m³, classant ces matériaux parmi les bétons très allégés. Ainsi, selon le dosage utilisé, une réduction de densité allant de 20 à 50 % peut être obtenue. Cette caractéristique rend la diatomite particulièrement intéressante pour la fabrication de bétons légers, notamment dans les applications nécessitant une réduction de la charge structurelle sans compromettre l'isolation thermique ou phonique.

- *Absorption*

L'absorption dans les bétons légers à base de diatomées repose sur une combinaison de la microstructure du matériau et des propriétés intrinsèques des granulats légers. Dans ce contexte, la diatomée, un matériau siliceux naturellement poreux, influence significativement le comportement hydrique du béton.

L'incorporation de diatomées modifie les propriétés du béton diatomite :

- La résistance mécanique diminue proportionnellement au taux d'absorption, en raison de la faible densité des granulats (1,8 à 2,2 t/m³ contre 2,4 t/m³ pour un béton standard)
- La conductivité thermique s'améliore grâce à l'air piégé dans les pores
- Le phénomène d'absorption se produit principalement dans les premières minutes, avec 50% du taux maximal atteint en moins de 5 minutes [26].

La courbe de l'absorption d'eau en fonction des dosages en diatomite (0 %, 5 %, 10 %, 15 %) révèle une évolution particulière. À 0 %, l'absorption atteint 8,75 %, puis diminue légèrement à 8,5 % pour un dosage de 10 %. Toutefois, entre 10 % et 15 %, l'absorption augmente de nouveau pour atteindre un maximum de 10,5 %. Ces résultats indiquent que le taux de 15 % de diatomite présente l'absorption d'eau la plus élevée, contrairement à l'hypothèse initiale qui suggérait une valeur minimale à 10 % [27].

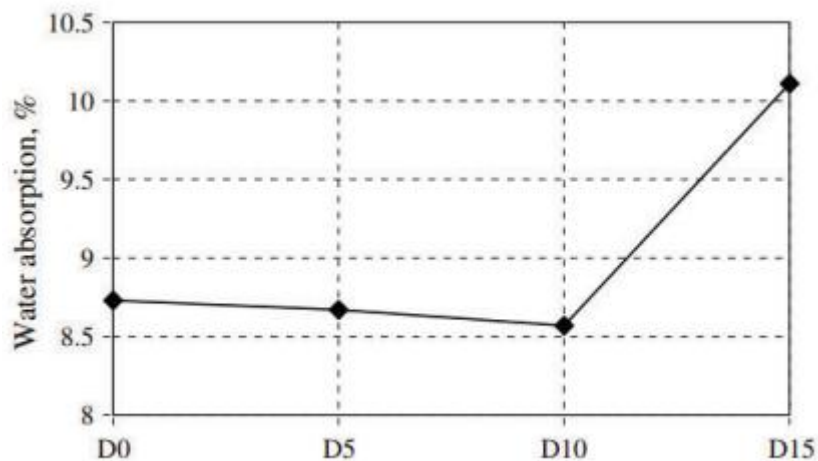


Figure 2.3 Absorption d'eau de mortier incorporé avec différentes quantités de diatomite [27]

- *Porosité*

Les granulats légers sont des matériaux poreux utilisés dans la fabrication de bétons légers, caractérisés par une masse volumique réduite (entre 400 et 800 kg/m³ pour les granulats, et

1200–2000 kg/m³ pour les bétons associés). Leur porosité, définie comme le rapport entre le volume des pores et le volume total du granulat, varie généralement de 25 % à 75 %, ce qui influence directement leurs propriétés mécaniques et thermiques. En effet, plus la taille des grains augmente, plus la porosité s'accroît.

L'incorporation de diatomite dans le béton entraîne une augmentation notable de sa porosité totale. Cette augmentation s'explique par deux facteurs principaux. Tout d'abord, la diatomite est un matériau naturellement très poreux, présentant une porosité pouvant atteindre 80 à 90 %. Ensuite, sa présence dans le mélange modifie la microstructure de la matrice cimentaire, en favorisant la formation de vides d'air supplémentaires. Ainsi, la diatomite agit à la fois comme un agent poreux intrinsèque et comme un modificateur de la structure interne du béton, ce qui contribue à une porosité globale plus élevée. À titre de comparaison, un béton ordinaire présente généralement une porosité totale comprise entre 10 et 15 %, tandis qu'un béton incorporant de la diatomite peut atteindre une porosité de 20 à 35 %, voire davantage selon le taux d'ajout et la formulation adoptée. Cette augmentation de la porosité peut s'avérer bénéfique pour certaines applications, notamment en matière d'isolation thermique ou acoustique, mais elle peut également influencer les propriétés mécaniques et la durabilité du matériau.

b. Caractéristiques rhéologiques

➤ Ouvrabilité

Pour évaluer l'ouvrabilité d'un béton léger contenant de la diatomite, on utilise généralement les mêmes essais normalisés (**NF EN 12350-2**) que pour les bétons classiques, notamment l'essai au cône d'Abrams, qui permet de mesurer la consistance et la maniabilité du béton frais [28]. L'ajout de diatomite, en tant que matériau pouzzolanique, améliore certaines propriétés du béton durci (résistance mécanique, durabilité, isolation thermique), mais nécessite souvent une adaptation de la formulation, notamment par l'ajout d'adjuvants, pour garantir une bonne ouvrabilité et une consistance adaptée à l'usage visé [29]. Pour les étapes :

1. On Place un cône tronconique normalisé (hauteur 30 cm, diamètre supérieur de 10 cm et diamètre inférieur de 20 cm) sur une surface plane et humide.
2. Remplissage : Remplir le cône en trois couches de béton frais, en compactant chaque couche à l'aide d'une tige de compactage.
3. Arasage : Araser la surface supérieure du cône.
4. Mesure : Retirer le cône verticalement et mesurer l'affaissement (slump) du béton à l'aide d'une règle graduée, entre le sommet du cône et le sommet du béton affaissé.
5. Interprétation : L'affaissement obtenu indique la consistance du béton :

- 2-4 cm : béton rigide
- 5-9 cm : béton plastique
- 10-15 cm : béton fluide [30]

L'affaissement est un indicateur clé de la consistance et de la maniabilité du béton, important pour adapter le mélange aux conditions de mise en œuvre.

➤ *Rhéologie*

Les essais de rhéologie sur les bétons légers à base de diatomite visent à caractériser leur comportement à l'état frais, notamment leur fluidité, seuil d'écoulement et viscosité plastique. Ces paramètres sont cruciaux pour optimiser leur mise en œuvre et leurs performances mécaniques finales. L'incorporation de la diatomite modifie significativement la rhéologie par :

- Augmentation de la demande en eau due à la porosité élevée des particules.
- Réduction de la ségrégation grâce à la morphologie anguleuse des granulats.
- Comportement pseudo-plastique avec seuil d'écoulement élevé.

c. Caractéristiques mécaniques

➤ *Résistance à la compression*

Grâce à une formulation appropriée et à l'utilisation de granulats légers, il est possible d'obtenir une résistance à la compression comparable à celle du béton traditionnel. Au fil du temps, on cherche à améliorer les performances globales du matériau, y compris celles du béton léger. L'incorporation d'additifs minéraux (comme la fumée de silice, les cendres volantes ou les laitiers) et d'adjuvants (tels que les entraîneurs d'air [AEA], les superplastifiants [SP], les réducteurs d'eau [WR] et les accélérateurs de prise) peut notamment être envisagée pour assurer une bonne ouvrabilité tout en limitant le rapport eau/liant (E/L) [30]. L'ajout de diatomite (ou terre de diatomées) dans la formulation du béton permet d'améliorer la résistance à la compression, notamment grâce à sa réactivité pouzzolanique et à sa capacité à densifier la structure interne du matériau. Le graphe représentant la résistance à la compression en fonction de la température pour un dosage à 0 bars montre que la pression reste stable jusqu'à environ 800°C. Au-delà de cette température, elle augmente progressivement pour atteindre 10 MPa à 1000°C. De manière générale, la pression demeure presque constante, oscillant entre 7 et 9 MPa de 0 à 800°C, avant de s'élever à 12 MPa à 1000°C. Par la suite, la pression continue d'augmenter jusqu'à atteindre 13 MPa [31].

Dans cette étude, la diatomite recyclée est utilisée comme substitut partiel du ciment dans le béton, avec des taux de remplacement allant de 5 % à 45 %, par incréments de 5 %. Les résultats indiquent que la résistance à la compression se maintient à 7 jours, puis s'améliore aux âges de

28 et 90 jours. Toutefois, au-delà de 20 % de substitution, une diminution de la résistance est observée. Le taux optimal est atteint à 20 %, avec une résistance maximale de 45 MPa après 90 jours de cure [32,33,34].

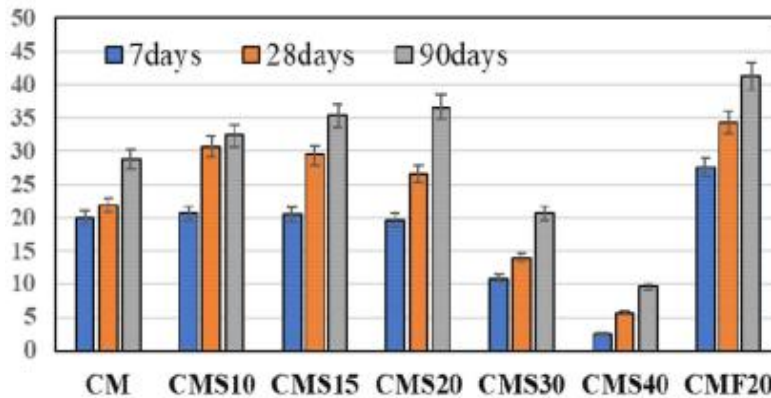


Figure 2.4 Résistance à la compression du mortier de ciment à base de diatomite et fumée de silice [32,33,34]

C : Ciment.

CM : mortier de ciment.

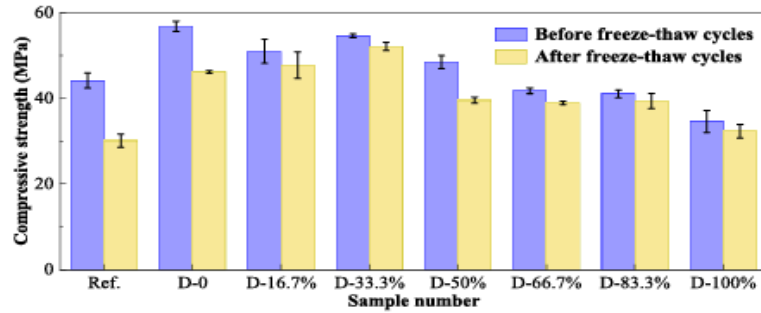
CMS : diatomite recyclée.

CMF : fumée de silice.

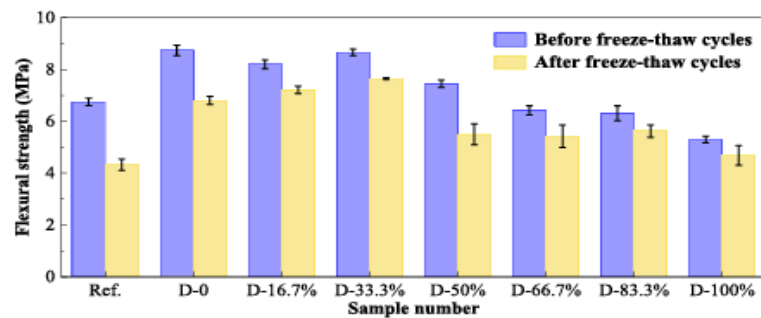
➤ *Résistance à la flexion*

À l'instar du béton ordinaire, le béton léger présente une faible résistance à la flexion. Ce phénomène est encore plus marqué dans le cas du béton léger, en raison de la possibilité de propagation des fissures à travers les granulats eux-mêmes. Par exemple, des résistances à la traction par fendage comprises entre 3,3 et 4,2 MPa ont été rapportées pour des bétons d'une masse volumique de 1940 kg/m³, tandis que des valeurs allant de 3,5 à 5,6 MPa ont été observées pour des bétons dont la masse volumique variait entre 1620 et 1885 kg/m³ [35].

Deux graphiques illustrent les résistances en compression et en flexion, comparant les valeurs **avant** et **après gel**. Les résultats montrent une diminution de la résistance après gel par rapport aux valeurs mesurées avant. L'incorporation de diatomite améliore la résistance jusqu'à un taux optimal de **33,3 %**, au-delà duquel une baisse progressive de la performance mécanique est observée [36].



(a) Compressive strength



(b) Flexural strength

Figure 2.5 Variation de la résistance à la compression et la flexion des échantillons soumis aux cycles gel-dégel [36]

Le graphique montre la résistance mécanique relative du mortier à 14, 28 et 90 jours, avec des ajouts de 10 % et 20 % de cendres volantes (F) et de diatomite (D). On observe une augmentation progressive de la résistance avec l'ajout de ces matériaux, de manière plus marquée pour D20 %, qui atteint la meilleure résistance à 90 jours. Pour les cendres volantes, le meilleur résultat est obtenu à 28 jours avec 20 % d'ajout. Bien que les résistances restent inférieures à celle du témoin, D20 % se distingue comme le plus performant, avant et après exposition à la corrosion acide, avec une résistance atteignant environ 5,5 MPa à 90 jours.

➤ Ultrason

L'essai ultrasonique sur béton léger à base de diatomite constitue une méthode non destructive visant à caractériser la résistance mécanique et l'intégrité interne du matériau. Ce type de béton tire parti des propriétés spécifiques de la diatomite, une roche siliceuse poreuse, pour optimiser à la fois la légèreté, les performances thermiques et la résistance mécanique du composite [37].

L'essai consiste à émettre des ondes ultrasonores à travers, un échantillon de béton à l'aide de transducteurs placés sur des faces opposées de l'éprouvette. Ainsi, la vitesse de propagation des

ondes ultrasonores (ondes de compression) est mesurée. Cette vitesse est liée à la densité, à l'homogénéité et à la résistance du matériau. Un gel est souvent utilisé pour assurer un bon contact entre les transducteurs et la surface du béton [38]. La vitesse ultrasonique permet de suivre l'évolution de la résistance à la compression du béton léger, y compris celui contenant de la diatomite ou d'autres granulats légers. Des études ont montré une bonne corrélation entre la vitesse des ultrasons et la résistance mécanique, ce qui permet d'estimer la qualité et la performance du béton sans le détruire.



Figure 2.6 Appareil ultrason [66]

d. Caractéristiques chimiques

➤ *Composition chimique*

La composition chimique de la diatomite dépend de son origine géologique, mais elle est généralement dominée par la silice amorphe (SiO₂). Voici une composition typique en % massique :

- SiO₂ (silice) 70 – 90 %
- Al₂O₃ (alumine) 1 à 5 %
- Fe₂O₃ (oxyde de fer) 0,5 à 3 %
- CaO (chaux) 0,5 à 2 %
- MgO (oxyde de magnésium) 0,2 à 1 %
- Na₂O + K₂O (alcalins) 0,2 à 1 %

• *Microscope électronique à balayage*

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une méthode d'analyse qui permet d'obtenir des images très détaillées de la surface d'un matériau. Elle fonctionne en envoyant un faisceau

d'électrons sur l'échantillon, ce qui permet d'observer la forme, la texture et la structure à une échelle microscopique.

L'observation de la diatomite au microscope électronique à balayage (MEB) permet de visualiser sa structure microscopique ainsi que sa porosité tridimensionnelle. Cette roche sédimentaire siliceuse est constituée principalement de frustules, c'est-à-dire des enveloppes siliceuses fossilisées de diatomées, qui confèrent à la diatomite sa texture poreuse et sa grande surface spécifique. qui confère à la diatomite ses propriétés exceptionnelles d'absorption, de filtration, et d'isolation thermique. Cette technique met en évidence la structure détaillée des diatomées, souvent invisibles au microscope optique, et permet de mieux comprendre ses caractéristiques physico-chimiques comme sa grande inertie chimique, sa faible densité, et sa dureté.

e. Caractéristiques thermiques

L'ajout de diatomite dans le béton améliore ses performances en matière d'isolation thermique. La conductivité thermique du béton classique est assez élevée, entre 1,4 et 2,5 W/m·K, ce qui signifie qu'il laisse facilement passer la chaleur. En incorporant 10 % de diatomite, cette conductivité diminue à environ 0,7 – 1,0 W/m·K. Avec un taux de 20 à 30 %, elle peut encore baisser jusqu'à 0,3 – 0,6 W/m·K. Lorsque la quantité de diatomite dépasse 40 %, le béton devient un très bon isolant, avec des valeurs allant de 0,2 à 0,4 W/m·K. Cependant, plus la diatomite est présente en grande quantité, plus la résistance mécanique du béton peut diminuer. Il faut donc trouver un bon équilibre selon l'usage prévu.

En ce qui concerne la capacité thermique spécifique, c'est-à-dire la capacité du matériau à stocker la chaleur, le béton classique a une valeur d'environ 0,84 kJ/kg·K. La diatomite pure a une capacité un peu plus faible, entre 0,62 et 0,75 kJ/kg·K. Lorsqu'on ajoute de la diatomite au béton, cette capacité reste assez proche de celle du béton classique, autour de 0,70 à 0,80 kJ/kg·K. Cela signifie que le béton avec diatomite conserve une bonne capacité à emmagasiner la chaleur, tout en offrant une meilleure isolation thermique.

2.2.5 AVANTAGES ET INCONVIENTS DU BETON A BASE DE DIATOMITE

➤ *Avantages*

- **Légèreté** : Le béton est beaucoup plus léger que le béton traditionnel, ce qui facilite la manutention et réduit les charges sur les structures, permettant d'alléger les fondations ou d'augmenter les portées entre appuis.

- Isolation thermique et phonique : Grâce à sa structure alvéolaire, il offre une excellente isolation thermique et acoustique, améliorant le confort intérieur et réduisant les consommations énergétiques [39].
- Résistance au feu et au gel : La composition lui confère une meilleure tenue aux conditions extrêmes comme le gel-dégel et le feu [39].
- Facilité de mise en œuvre : Le béton léger est simple à mettre en œuvre, avec une bonne maniabilité, ce qui est un avantage en préfabrication et rénovation [40].
- Propriétés mécaniques équilibrées : Le béton de diatomée combine légèreté, résistance mécanique correcte et isolation thermique grâce aux propriétés uniques de la diatomite [41].

➤ ***Inconvénients***

- Résistance mécanique plus faible : Sa résistance à la traction et en général est inférieure à celle du béton traditionnel, ce qui limite certaines applications structurelles lourdes.
- Coût plus élevé : L'utilisation de granulats spécifiques comme la diatomée et un dosage en ciment plus important entraînent un surcoût par rapport au béton classique.
- Sensibilité aux variations hygrothermiques : Le béton léger peut être plus sensible aux variations d'humidité et de température, ce qui peut provoquer des retraits ou gonflements.
- Porosité élevée : Cette caractéristique nécessite souvent un enrobage renforcé des armatures pour éviter la corrosion.
- Complexité de fabrication : Sa formulation demande un contrôle précis pour garantir ses performances, ce qui peut compliquer sa production [42].

2.3 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié la diatomite, un matériau naturel léger et poreux, ainsi que son utilisation dans la construction. Nous avons analysé ses principales caractéristiques, la manière dont elle peut être incorporée dans les mélanges, et l'impact de cette incorporation sur les propriétés du béton ou mortier à base de diatomite, telles que la solidité, la résistance et la durabilité. Nous nous sommes également intéressés aux avantages que la diatomite peut offrir, notamment en matière de performance environnementale, tout en prenant en compte les limites qu'elle peut présenter.

Chapitre **3**

MATERIAUX, FORMULATION ET CARACTERISATION DU BETON

3.1 INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à la formulation et à la caractérisation d'un béton léger à base de diatomite, en considérant également le cas de l'ajout de fibres pour améliorer ses performances mécaniques. L'étude commence par une caractérisation approfondie des matériaux de base, à savoir le sable, le gravier, l'adjuvant, la fibre et la diatomite, à travers la détermination de leur masse volumique, élément clé dans l'élaboration des dosages. Une analyse granulométrique est réalisée afin d'évaluer la distribution des tailles de grains, ce qui permet d'optimiser la compacité du mélange. Cette dernière permet de déterminer la répartition des tailles de grains et d'optimiser les dosages en utilisant la méthode de Dreux-Gorisse, appliquée uniquement au sable et au gravier. La formulation des bétons est ensuite présentée en tenant compte des spécificités des matériaux utilisés, afin d'obtenir un mélange répondant aux exigences mécaniques et de légèreté souhaitée.

3.2 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

3.2.1 CIMENT

Le ciment utilisé dans nos essais provient de l'entreprise Giga Béton (Groupe Industriel des Ciments d'Algérie). C'est un ciment portland au calcaire pour tous travaux de construction nécessitant des résistances élevées, il est aussi recommandé pour les utilisations de constructions des ouvrages d'art (ponts et tunnels...), infrastructures et superstructures pour bâtiments ; conforme à la Norme Algérienne NA 442-2013 classe CEM II /A-P 42.5 N [43]. Les tableaux 3.1 à 3.4 donnent respectivement les caractéristiques physiques et chimiques et mécaniques du ciment.

Consistance normale	26 à 28 %
Début de prise	≥ 60 min
Fin de prise	150 à 350 min
Expansion	< 5 mm
Finesse (SSB)	3200 - 4200 (cm ² /g)

Tableau 3.1 Propriétés physiques du ciment [43]

2 jours (EN 1-196)	≥ 10 MPa
28 jours (EN 1-196)	≥ 42,5 MPa

Tableau 3.2 Résistance à la compression du ciment [43]

Teneur en sulfates (SO ₃)	< 2,5 %
Teneur en Chlorures (Cl)	< 0,1 %
Teneur en (MgO)	< 1 %
Perte au feu (PAF)	0,5 - 8,5 %

Tableau 3.3 Composition chimique du ciment [43]

C3S	60 ± 3 %
C3A	3 - 7,5 %

Tableau 3.4 Composition minéralogique du clinker de ciment [43]

3.2.2 ADJUVANT

L'adjuvant utilisé est le Sika Viscocrete 4037 RMX, un superplastifiant/haut réducteur d'eau à base de polycarboxylates. Il permet d'améliorer la fluidité du béton tout en réduisant significativement la quantité d'eau nécessaire. Il permet d'obtenir un béton plus résistant, durable et facile à mettre en œuvre. Ses caractéristiques techniques sont récapitulées comme suit :

- Aspect : Liquide clair à légèrement trouble.
- Base chimique : Polymères polycarboxylates modifiés.
- Densité : Environ 1,05 kg/l (varie selon la formulation).
- pH : Généralement alcalin, autour de 6 à 8.
- Teneur en chlorures : Très faible, généralement $\leq 0,1$ % (conforme aux normes pour béton armé).
- Pouvoir réducteur d'eau : Élevé, permettant une réduction d'eau importante (jusqu'à 30 %), ce qui améliore la compacité et la résistance mécanique du béton.
- Effet sur la rhéologie : Améliore la fluidité et la maniabilité du béton frais sans augmenter la teneur en eau.
- Maintien d'ouvrabilité : Permet un temps d'utilisation prolongé, même en conditions chaudes.
- Compatibilité : Adapté à une large gamme de ciments, y compris ceux à teneur moyenne ou élevée en sulfates alcalins.
- Conditions de stockage : À l'abri du gel et des rayons directs du soleil, à des températures comprises entre +5 °C et +35 °C. En cas de gel accidentel, le produit retrouve ses propriétés après un dégel lent et une homogénéisation [44 45 46].

3.2.3 SABLES ET GRAVIERS

Pendant les essais réalisés, les granulats utilisés (sable et gravier 3/8 et 8/16) ont été fournis par l’entreprise ENG (Entreprise Nationale des Granulats) et proviennent de la région de Sidi Abdelli à Tlemcen. Des essais d’identification physiques ont été élaborés dessus.

➤ *Masses volumiques*

Tout d’abord, on mesure la masse volumique apparente et absolue du sable et graviers 3/8 et 8/16 avec la méthode de l’éprouvette et la méthode du ballon.

➤ *Masse volumique apparente*

Selon la norme NF EN 1097-3 utilisée pour déterminer la masse volumique apparente, celle-ci a été déterminée après trois essais. Les masses volumiques moyennes sont récapitulées dans le tableau 3.5 qui suit :

Granulats	ρ_{app}
Sable	1460 kg/m ³
Gravier 4/8	1332,6 kg/m ³
Gravier 8/16	1350 kg/m ³

Tableau 3.5 Masses volumiques apparentes des granulats

➤ *Masse volumique absolue*

Deux méthodes pour la détermination de la masse volumique absolue ont été utilisées, celle du ballon et de l’éprouvette.

Méthode de l’éprouvette

Nous avons réalisé trois essais afin d’obtenir un résultat moyen, pour chaque essai on remplit un volume d’eau $V1$, puis on ajoute une masse m de granulat, et enfin en lisant le nouveau volume $V2$. Après avoir calculé avec la formule suivante :

$$\rho_{abs} = \frac{m}{V2-V1}$$

Les valeurs des masses volumiques obtenues sont récapitulées dans le tableau qui suit :

Granulats	ρ_{abs}
Sable	2833 kg/m ³
Gravier 4/8	2906 kg/m ³
Gravier 8/16	3000 kg/m ³

Tableau 3.6 Masse volumiques absolues des granulats (Méthode de l’éprouvette)

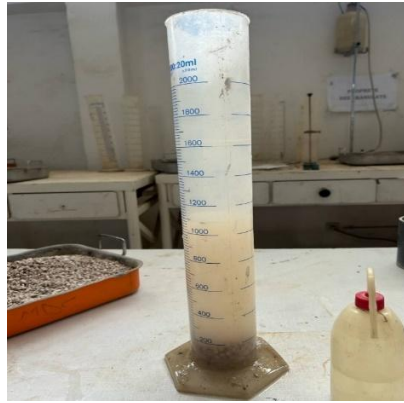


Figure 3.1 Masse volumique (Méthode de l'éprouvette)

Méthode de du ballon

Cette méthode a une précision supérieure à celle de l'éprouvette. Nous avons rempli le ballon avec une masse d'eau M1 en veillant soigneusement à éliminer toutes les bulles d'air, ensuite on ajoute un échantillon de granulat d'une masse M2. Enfin nous avons mesuré la masse M3, correspondant à la masse combinée du granulat M2 immergé dans le ballon rempli de l'eau.

$$\rho_{abs} = \frac{M2}{(M1+M2)-M3}$$

Après deux essais successifs, les résultats moyens obtenus sont les suivants :

Granulats	ρ_{abs}
Sable	2650 kg/m ³
Gravier 4/8	2640 kg/m ³
Gravier 8/16	2750 kg/m ³

Tableau 3.7 Masses volumiques absolues du sable et des graviers (Méthode du ballon)



Figure 3.2 Masse volumique (Méthode du ballon)

Étant donné que les résultats obtenus par la méthode du ballon sont plus précis que ceux de la méthode de l'éprouvette, ce sont les valeurs issues de cette méthode qui seront retenues pour les calculs à venir.

3.2.4 DIATOMITE

Pour la formulation de notre béton léger, la diatomite naturelle utilisée a été extraite au niveau de la commune de Benabdelmalek Ramdane dans la wilaya de Mostaganem. Ce matériau a été sélectionné en raison de ses propriétés spécifiques, adaptées aux exigences techniques recherchées.

➤ *Masses volumiques*

Suivant les mêmes méthodes citées précédemment, les masses volumiques absolues et apparentes des granulats de la diatomite après broyage et tamisage ont été déterminées après trois essais effectués et les moyennes sont récapitulées dans les tableaux 3.8 à 3.10.

Granulats	P_{app}
Sable diatomite	388 kg/m ³
Diatomite 4/8	385 kg/m ³
Diatomite 8/16	340 kg/m ³

Tableau 3.8 Masses volumiques apparentes des granulats de diatomite

Granulats	ρ_{abs}
Sable diatomite	1533 kg/m ³
Diatomite 4/8	1500 kg/m ³
Diatomite 8/16	1233 kg/m ³

Tableau 3.9 Masses volumiques apparentes des granulats de diatomite (Méthode de l'éprouvette)

Granulats	ρ_{abs}
Sable diatomite	1555 kg/m ³
Diatomite 4/8	1450 kg/m ³
Diatomite 8/16	1505 kg/m ³

Tableau 3.10 Masses volumiques apparentes des granulats de diatomite (Méthode du ballon)



Figure 3.3 Masse volumique apparente

➤ *Microscope électronique à balayage*

L'observation de la diatomite au microscope électronique à balayage (MEB) révèle une structure alvéolaire bien définie, caractérisée par un réseau poreux tridimensionnel (Figure 3.4). Cette morphologie, typique des frustules de diatomées fossiles, confirme la nature hautement microporeuse du matériau, ce qui lui confère non seulement un fort potentiel en tant qu'agent de légèreté ou support adsorbant, mais aussi d'excellentes propriétés d'isolation thermique, en raison de sa faible conductivité et de sa capacité à piéger l'air dans sa structure interne.

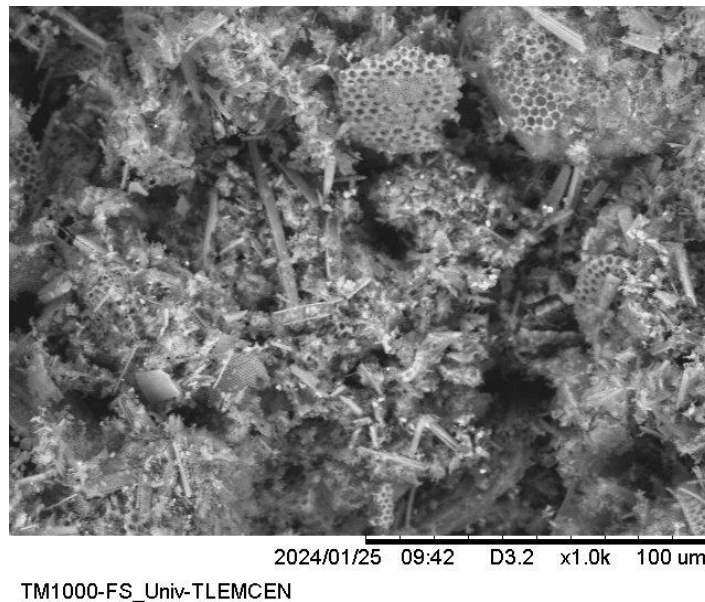


Figure 3.4 La diatomite au microscope électronique à balayage

➤ *Absorption d'eau*

La diatomite, en raison de sa porosité élevée et de sa structure microporeuse, présente une capacité significative d'absorption d'eau (Tableau 3.11).

Granulats	Absorption (%)
Sable diatomite	114
Diatomite 4/8	105
Diatomite 8/16	90

Tableau 3.11 Pourcentage d'absorption d'eau de la diatomite

Compte tenu de ce taux d'absorption, il est nécessaire d'ajuster le dosage en eau lors de la formulation du béton.

3.2.5 ANALYSE GRANULOMETRIQUE

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent un granulats. Pour cela l'analyse consiste à séparer et classer à l'aide de tamis ces grains selon leur diamètre. La représentation graphique de l'analyse permet d'observer et d'exploiter ces informations très simplement. Elle concerne les granulats d'un diamètre supérieur à 100 micromètres (0.001mm).

L'essai consiste à classer un échantillon de matériau granulaire en différentes classes de tailles décroissantes à l'aide d'une série de tamis emboîtés, dont les mailles sont normalisées et décroissent du haut vers le bas. Après avoir préparé et éventuellement séché l'échantillon, on le place dans le tamis supérieur puis on soumet la colonne de tamis à une agitation vibratoire pour séparer les grains selon leur taille (Figure 3.5). Chaque fraction retenue sur un tamis (refus) est ensuite pesée, et les masses sont exprimées en pourcentage de la masse totale initiale. Ces données permettent de tracer la courbe granulométrique, qui représente la répartition dimensionnelle des grains dans l'échantillon, essentielle pour caractériser les propriétés du matériau. Cette méthode est généralement réalisée à sec pour les matériaux non argileux, en respectant les normes telles que la série de tamis EN 933-2, et nécessite une quantité d'échantillon adaptée à la granulométrie étudiée [47 48 49 50].



Figure 3.5 : Essai de tamisage

Les courbes obtenues pour chaque matériau et classe de granulats sont représentées sur la figure 3.6.

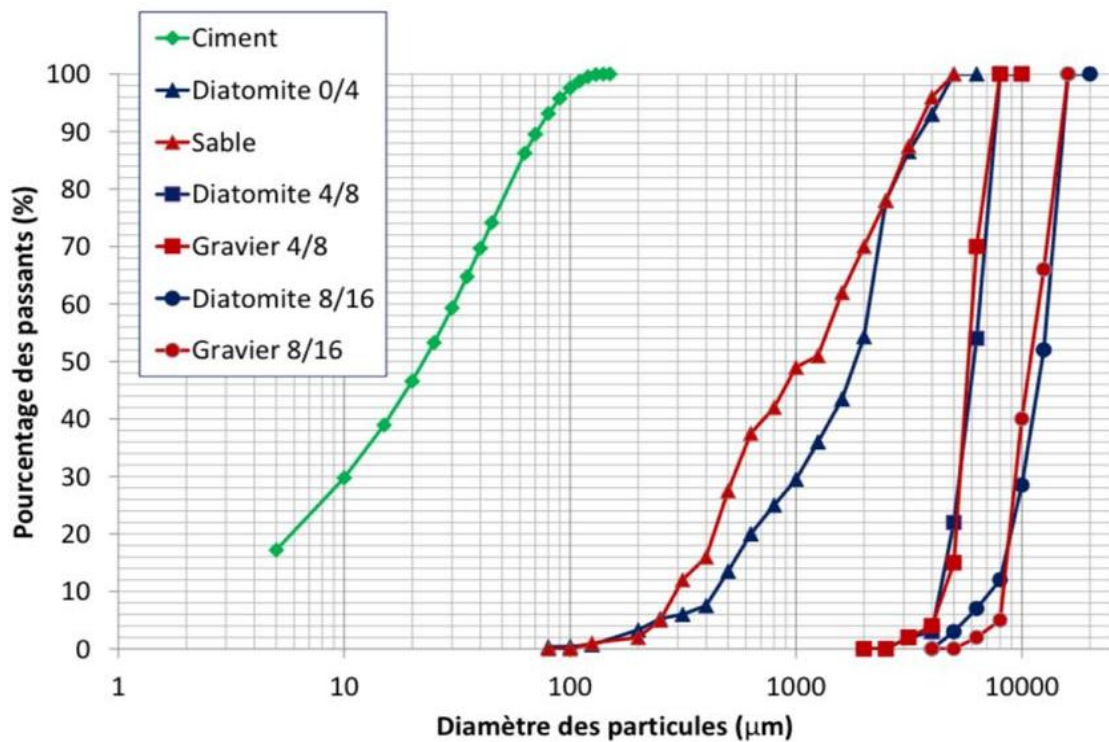


Figure 3.6 Courbes granulométriques des différentes classes et différents matériaux

Les courbes granulométriques des granulats ordinaires et de ceux à base de diatomite présentent des profils assez similaires. Cette ressemblance permet d'appliquer les mêmes méthodes de

calcul pour la détermination des proportions de granulats dans la formulation du béton. Ainsi, les quantités de granulats de diatomite peuvent être estimées de manière comparable à celles utilisées pour les matériaux classiques ou ordinaires. Le sable ordinaire présente un module de finesse de 2,94, selon les calculs réalisés.

3.3 FORMULATION DU BETON

L'objectif de notre étude est de formuler différents types de bétons (ordinaire et à base de diatomite), puis de confectionner des éprouvettes en vue de les soumettre à des essais expérimentaux. Pour ce faire, nous établirons les dosages nécessaires à partir de la méthode de Dreux-Gorisse.

La méthode de Dreux-Gorisse est une technique de formulation du béton qui permet de déterminer les quantités optimales des matériaux constitutifs (ciment, eau, sable, gravillon et gravier) nécessaires pour fabriquer un mètre cube de béton conforme au cahier des charges. Elle vise à obtenir un béton avec une bonne maniabilité (ouvrabilité) et une résistance mécanique adaptée à l'ouvrage à réaliser [51 52].

Cette méthode repose sur plusieurs étapes successives :

- Calcul du rapport ciment/eau (C/E) à partir de la résistance en compression souhaitée à 28 jours et de la classe du ciment, via la formule de Bolomey.
- Détermination des dosages en ciment et en eau selon le rapport E/C et l'affaissement désiré au cône d'Abrams, qui caractérise la maniabilité.
- Choix du mélange granulaire optimal à minimum de vides, en équilibrant les proportions de sable, gravillon et gravier pour une compacité maximale du béton.
- Calcul de la compacité du béton pour garantir un mélange dense et homogène.
- Détermination des masses exactes des granulats à utiliser en fonction de leurs densités et proportions en volume [51 52 53].

La méthode combine des calculs théoriques et des abaques graphiques pour aboutir à une formulation rationnelle, adaptée aux matériaux locaux et aux exigences techniques.

3.3.1 Formulation du béton ordinaire

Après avoir effectué les calculs selon la méthode de Dreux-Gorisse et avec un rapport E/C = 0,5 et un dosage en ciment de 350 Kg/m³, les valeurs obtenues pour les volumes absolus, les densités et les masses pour les granulats ordinaires (BO : béton ordinaire) et pour 1m³ de béton sont les suivantes :

Constituants	Densité absolue	Volume absolu (l)	Masse (kg)
Ciment	3,1	112,90	350
Sable	2,65	311	824
Gravier 4/8	2,64	64	200
Gravier 8/16	2,74	332	876
Eau	-	-	175

Tableau 3.12 Densités et quantités des constituants pour 1 m³ de béton ordinaire

3.3.2 Formulation du béton à base de diatomite

Afin d'alléger le béton et lui procurer de meilleures caractéristiques thermiques, les granulats du béton ordinaire ont été substitués par les granulats de diatomite. La substitution a été faite suivant plusieurs pourcentages récapitulés dans le tableau 3.12. La substitution a été effectuée en volume, de manière à remplacer progressivement chaque type de granulats ordinaire par de la diatomite, selon des taux variant de 25 % à 100 %. La masse de chaque classe et pourcentage de diatomite a été calculée avec la formule suivante :

$$m(\text{Diatomite}) = \frac{m(\text{Granulat ordinaire})}{\rho_{app}(\text{Granulat ordinaire})} \times \rho_{app}(\text{Diatomite})$$

La quantité d'eau pour un béton ordinaire est de 175 kg/m³. Toutefois, lorsque les granulats sont remplacés par de la diatomite, dont le taux d'absorption est élevé, il est nécessaire d'adapter le dosage en eau afin de tenir compte de cette propriété. Un coefficient multiplicateur, correspondant au taux d'absorption spécifique de chaque composant, a été appliqué. Cette correction permet d'ajuster avec précision la quantité d'eau en fonction de la proportion de diatomite utilisée dans la formulation afin de garantir un mélange homogène et des performances mécaniques conformes aux exigences.

% de substitution	BO	BD 25%	BD 50%	BD 75%	BD 100%
Ciment (Kg)	350				
Sable (Kg)	847,82	635,86	432,91	211,95	-
Gravier 4/8 (Kg)	201,09	151,08	100	50	-
Gravier 8/16 (Kg)	869,56	652,17	434,78	217,39	-
Sable diatomite (Kg)	-	55,43	109,78	168,47	225
Diatomite 4/8 (Kg)	-	14,13	29,34	43,47	57,60
Diatomite 8/16 (Kg)	-	54,34	108,69	164,13	218,47
Eau (Kg)	175,00	295,21	427,17	668,69	686,95
Adjuvant : 0,3% C (Kg)	1,05				

Tableau 3.13 Quantités des constituants pour 1m³ de béton diatomite

Pour réaliser nos essais, le béton a été moulé dans des cylindres de dimensions 11 cm de diamètre sur 22 cm de hauteur pour des essais de résistance à la compression, ainsi que dans

des éprouvettes prismatiques de dimensions 7 cm × 7 cm × 28 cm pour des essais de résistance à la traction (Figure 3.6). Par la suite, nous avons déterminé le volume de chaque moule afin de calculer précisément les quantités nécessaires des matériaux constitutifs du béton pour remplir les éprouvettes nécessaires aux essais.



Figure 3.7 Moules cylindriques et prismatiques

3.3.3 Formulation du béton fibré à base de diatomite

Dans cette étude, les fibres utilisées pour renforcer le béton léger proviennent de l'entreprise OCReinforcements. Cette entreprise est spécialisée dans la fabrication de fibres destinées à améliorer les performances des matériaux de construction. Ces fibres sont ajoutées au béton pour renforcer sa résistance, réduire les fissures et améliorer sa durabilité. Leur utilisation est particulièrement utile ici, car la diatomite, bien qu'elle allège le béton, peut réduire sa résistance. L'ajout des fibres de OC Reinforcements permet donc d'obtenir un béton plus solide. Elles ont comme propriétés :

- Densité : Les fibres de polypropylène sont plus légères, avec une densité d'environ 0,91 g/cm³.
- Longueur et diamètre : Les fibres sont généralement coupées en longueurs variant de 6 à 12 mm et ont un diamètre de 0,1 à 0,3 mm, ce qui permet une bonne dispersion dans le mélange de béton.
- Aspect : Les fibres de polypropylène sont blanches ou translucides
- Résistance chimique : Les fibres de polypropylène sont également résistantes à de nombreux produits chimiques, mais moins efficaces contre les bases fortes.



Figure 3.8 Fibres OCR à l'œil nu et au microscope électronique

Afin d'essayer d'améliorer la résistance du béton léger, la fibre OCR est ajoutée lors du malaxage. La quantité minimale recommandée est de $0,6 \text{ kg/m}^3$ de béton. Dans notre cas le choix s'est porté sur $1,2 \text{ kg/m}^3$. Ainsi, la composition du béton fibré à base de diatomite est comme suit :

% de substitution	BOF	BDF 25%	BDF 50%	BDF 75%	BDF 100%
Ciment (Kg)	350				
Sable (Kg)	847,82	635,86	432,91	211,95	-
Gravier 4/8 (Kg)	201,09	151,08	100	50	-
Gravier 8/16 (Kg)	869,56	652,17	434,78	217,39	-
Sable diatomite (Kg)	-	55,43	109,78	168,47	225
Diatomite 4/8 (Kg)	-	14,13	29,34	43,47	57,60
Diatomite 8/16 (Kg)	-	54,34	108,69	164,13	218,47
Eau (Kg)	175,00	295,21	427,17	668,69	686,95
Adjuvant : 0,3% C (Kg)	1,05				
Fibre (Kg)	1,20				

Tableau 3.14 Quantités des constituants pour 1 m^3 de béton fibré

3.4 FORMULATION D'UN MORTIER EQUIVALENT BETON

Afin de réaliser un essai de rhéologie et compte tenu de la quantité insuffisante de granulats, nous avons opté pour un essai sur un mortier équivalent béton. Nous avons formulé notre mortier selon la méthode du béton équivalent qui vise à reproduire les propriétés du béton, notamment pour les essais de rhéologie. Cette méthode permet de simplifier l'étude du comportement du béton frais en remplaçant les gros granulats par une quantité équivalente de sable. Le mortier obtenu est utilisé pour évaluer des paramètres comme la fluidité, la viscosité ou l'ouvrabilité, tout en conservant les proportions représentatives du béton réel.

L'objectif consiste à déterminer la surface totale des granulats accessible à la pâte de ciment dans les bétons élaborés. Cette surface correspond à la somme des surfaces de toutes les particules qui composent le mélange granulaire. Pour ce calcul, chaque classe granulométrique est considérée comme un ensemble de particules homogènes en forme, taille et densité. Les hypothèses suivantes sont adoptées : les particules sont modélisées comme des sphères parfaites, indéformables dans l'eau malgré leur porosité, et la densité moyenne des particules au sein de chaque classe est constante, indépendante de la taille, et égale à celle du granulats. Cette approche permet de simplifier le calcul de la surface développée totale en tenant compte des caractéristiques physiques des granulats [56 57].

Le calcul de cette surface développée est réalisé selon les étapes suivantes, de manière chronologique [58] :

i. Calcul de la granulométrie du mélange des gravillons du béton

Si on considère par exemple deux gravillons G3 et G4, qui présentent les caractéristiques suivantes :

Gravillon	Dosage dans le béton	Masse volumique	Refus au tamis t_i
G3	g_3	ρ_3	ri_3
G4	g_4	ρ_4	ri_4

Tableau 3.15 Caractéristiques des gravillons du béton

Il est possible de déterminer la granulométrie du mélange des gravillons en calculant le refus à chacun des tamis couvrant l'ensemble des gravillons à recomposer. Le passant à chacun de ces tamis est déterminé par la formule :

$$r_i = (g_3.r_{i3} + g_4.r_{i4}) / (g_3 + g_4)$$

De même la masse volumique du mélange est déterminée par la relation :

$$\rho_g = (g_3.\rho_3 + g_4.\rho_4) / (g_3 + g_4)$$

ii. Définition des tranches granulaires successives dans ce mélange

Chaque tranche granulaire est limitée par un tamis supérieur [TM_i] et par un tamis inférieur [tm_i]. Les refus correspondant à ces tamis sont respectivement RM_i et rm_i (exprimé en %, par exemple 15 %).

Les tamis à considérer sont les suivants :

16 / 12,5 / 10 / 8 / 6,3 / 5 / 4 / 3,15 / 2,5 / 1,25 / 0,63 / 0,315 / 0,16 / 0,08 / <0,08 mm

iii. Calcul de la masse de chaque tranche granulaire

La masse m_i de chaque tranche granulaire est définie par la relation :

$$M_i = (rm_i - RM_i) \times (g_3 + g_4) / 100$$

iv. Calcul du diamètre de la particule moyenne dans chaque tranche

La particule moyenne de chaque tranche granulaire est définie comme étant la particule considérée sphérique par hypothèse présentant un diamètre (d_i) défini par la relation :

$$d_i = (TM_i + tm_i) / 2$$

v. Calcul du volume de la particule moyenne dans chaque tranche

Le volume de chaque type de particule moyenne est donné par la relation :

$$v_i = (\pi \cdot d_i^3) / 6$$

vi. Calcul de la surface développée de la particule moyenne dans chaque tranche

La surface développée pour chaque type de particule moyenne est donnée par la relation :

$$s_i = \pi \cdot d_i^2$$

vii. Calcul du volume massique de la matrice du gravillon du mélange

Le volume massique de la matrice du gravillon du mélange est déterminé à partir de la masse volumique du mélange.

$$\omega = 1 / \rho_g$$

viii. Calcul du volume total de l'ensemble des particules dans chaque tranche granulaire

Le volume total de l'ensemble des particules contenues dans une tranche granulaire est le produit de la masse de la tranche granulaire par le volume massique de la matrice du gravillon ;

$$V_i = \omega \cdot M_i$$

ix. Calcul du nombre de particules moyennes dans chaque tranche granulaire

Le nombre de particules moyennes est alors obtenu par le rapport du volume total de l'ensemble des particules de la tranche granulaire au volume unitaire de la particule moyenne :

$$N_i = V_i / v_i$$

x. *Calcul de la surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire*

La surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire est alors représentée par le produit de la surface développée de la particule moyenne par le nombre de particules moyennes :

$$S_i = N_i .s_i$$

xi. *Calcul de la somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillon*

La somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillon représente la surface développée de l'ensemble des gravillons :

$$SD = \sum_i S_i$$

Les surfaces calculées pour chaque matériau sont récapitulées dans les tableaux 3.14 à 3.19 qui suivent :

tm _i (mm)	TM _i (mm)	di (mm)	M _i (kg)	v _i (m ³)	s _i (m ²)	V _i (m ³)	N _i	S _i (m ²)
0	0,08	0,04	0,0097	0,000033	0,005	0,036	0	0
0,08	0,1	0,09	0,028	0,00038	0,025	0,01	26,315	0,657
0,1	0,125	0,1125	0,023	0,00074	0,039	0,008	10,810	0,421
0,125	0,25	0,187	0,268	0,0034	0,109	0,101	29,705	3,237
0,25	0,315	0,28	0,349	0,011	0,246	0,131	11,909	2,929
0,315	0,5	0,407	0,788	0,035	0,52	0,297	7,142	3,713
0,5	0,63	0,565	0,530	0,094	1,002	0,199	2,117	2,089
0,63	1	0,815	0,657	0,283	2,085	0,247	0,872	1,818
1	1,6	1,3	0,723	1,149	5,306	0,272	0,236	1,252
1,6	3,15	2,375	1,399	7,01	17,711	0,527	0,075	1,328
3,15	4	3,575	0,471	23,911	40,131	0,177	0,074	2,969
4	5	4,5	0,12	47,68	63,585	0,045	0,0009	0,057
5	6,3	5,65	0,005	94,38	100,236	0,001	0,0001	0,01
Σ								20,57

Tableau 3.16 Surface développée du sable ordinaire

tm _i (mm)	TM _i (mm)	d _i (mm)	M _i (kg)	v _i (m ³)	s _i (m ²)	V _i (m ³)	N _i	S _i (m ²)
0	2	1	0,039	0,523	3,14	0,147	28,1076	0,088
2	2,5	2,25	0,00539	5,96	15,896	0,002	0,335	0,005
2,5	3,15	2,825	0,00324	11,798	25,095	0,00122	0,103	0,002
3,15	4	3,575	0,0464	23,911	40,131	0,0175	0,731	0,029
4	5	4,5	0,7832	47,68	63,585	0,296	6,208	0,394
5	6,3	5,65	2,9883	94,38	100,236	1,129	11,962	1,199
6,3	8	7,15	1,524	191,29	160,524	0,576	3,011	0,483
Σ								2,2

Tableau 3.17 Surface développée du gravier ordinaire 4/8

tm _i (mm)	TM _i (mm)	d _i (mm)	M _i (kg)	v _i (m ³)	s _i (m ²)	V _i (m ³)	N _i	S _i (m ²)
0	5	2,5	0,0118	8,181	19,634	0,0424	0,513	0,01
5	6,3	5,65	0,037	94,437	100,287	0,013	0,137	0,013
6,3	8	7,15	0,213	191,38	160,606	0,076	0,397	0,063
8	10	9	0,826	381,703	254,469	0,297	0,778	0,197
10	12,5	11,25	2,401	745,514	397,607	0,864	1,158	0,46
12,5	16	14,25	1,883	1515,106	637,939	0,677	0,446	0,28
Σ								1,023

Tableau 3.18 Surface développée du gravier ordinaire 8/16

tm _i (mm)	TM _i (mm)	d _i (mm)	M _i (kg)	v _i (m ³)	s _i (m ²)	V _i (m ³)	N _i	S _i (m ²)
0	0,08	0,04	0,0021	0,000033	0,005	0,0013	3,939	0,019
0,08	0,1	0,09	0,0053	0,00038	0,025	0,0034	0,894	0,0223
0,1	0,125	0,1125	0,0118	0,00074	0,039	0,0075	10,135	0,395
0,125	0,25	0,187	0,0032	0,0034	0,109	0,002	0,588	0,064
0,25	0,315	0,28	0,0388	0,011	0,246	0,0249	2,63	0,55
0,315	0,5	0,407	0,1519	0,035	0,52	0,097	2,771	1,44
0,5	0,63	0,565	0,491	0,094	1,002	0,315	3,351	3,357
0,63	1	0,815	0,417	0,283	2,085	0,268	0,946	1,972
1	1,6	1,3	0,459	1,149	5,306	0,295	0,256	1,358
1,6	3,15	2,375	0,751	7,01	17,711	0,482	0,0687	1,216
3,15	4	3,575	0,656	23,911	40,131	0,421	0,076	0,706
4	5	4,5	1,179	47,68	63,585	0,757	0,0158	1,004
5	6,3	5,65	0,788	94,38	100,236	0,506	0,0053	0,531
Σ								12,63

Tableau 3.19 Surface développée du sable diatomite

tm _i (mm)	TM _i (mm)	d _i (mm)	M _i (kg)	v _i (m ³)	s _i (m ²)	V _i (m ³)	N _i	S _i (m ²)
0	2	1	0,056	0,523	3,14	0,0038	7,265	0,088
2	2,5	2,25	0,0026	5,96	15,896	0,00179	0,3	0,005
2,5	3,15	2,825	0,0079	11,798	25,095	0,0054	0,457	0,002
3,15	4	3,575	0,0614	23,911	40,131	0,0423	1,769	0,029
4	5	4,5	0,7168	47,68	63,585	0,4938	10,356	0,394
5	6,3	5,65	0,6917	94,38	100,236	0,4765	5,048	1,199
6,3	8	7,15	1,4686	191,29	160,524	1,01186	5,289	0,483
Σ								2,05

Tableau 3.20 Surface développée du gravier diatomite 4/8

tm _i (mm)	TM _i (mm)	d _i (mm)	M _i (kg)	v _i (m ³)	s _i (m ²)	V _i (m ³)	N _i	S _i (m ²)
0	5	2,5	0,018	8,181	19,634	0,011	1,344	0,026
5	6,3	5,65	0,03	94,437	100,287	0,019	0,201	0,02
6,3	8	7,15	0,211	191,38	160,606	0,139	0,726	0,116
8	10	9	0,519	381,703	254,469	0,342	0,98	0,249
10	12,5	11,25	0,697	745,514	397,607	0,46	0,458	0,182
12,5	16	14,25	1,425	1515,106	637,939	0,94	0,62	0,395
Σ								0,988

Tableau 3.21 Surface développée du gravier diatomite 8/16

Pour déterminer les quantités des matériaux nécessaires à la formulation d'un mortier équivalent béton, il est nécessaire de calculer la masse de sable pour remplacer les gravillons. Cette substitution se fait en respectant l'équilibre volumique, à l'aide de la formule suivante :

$$SD_g \times M_g = SD_s \times M_s \quad \Rightarrow \quad M_s = (SD_g \times M_g) / SD_s$$

Avec : SD_g : Surface développée du gravier

M_g : Masse du gravier

SD_s : Surface développée du sable

M_s : Masse du sable

Les masses des différents constituants pour 1m³ de mortier équivalent béton sont calculées récapitulées dans le tableau 4.19 suivant :

% de substitution	BO	BD 25%	BD 50%	BD 75%	BD 100%
	BOF	BDF 25%	BDF 50%	BDF 75%	BDF 100%
Ciment (Kg)	557,24				
Sable (Kg)	1423,75	1062,4	704,72	351,25	-
Sable diatomite (Kg)	-	214,48	426,83	638,24	847,23
Eau (Kg)	280,89	279,47	278,07	277,2	275,97
Adjuvant : 0,3% C (Kg)	1,05				
Fibres (Kg)	1,2				

Tableau 3.22 Quantités des constituants pour 1m³ de mortier équivalent béton

3.5 CONCLUSION

Il est essentiel d'analyser les caractéristiques de chaque matériau entrant dans la composition du béton léger, ainsi que de définir avec précision les proportions de chaque constituant. Cette démarche permet d'élaborer un béton léger à base de diatomite, avec ou sans fibres, présentant des performances physiques, mécaniques et thermiques optimales. Une formulation mal maîtrisée pourrait en effet compromettre les propriétés finales du matériau, tant en termes de

durabilité que de performance. Le chapitre suivant sera donc consacré à l'étude détaillée de ces aspects, afin d'identifier les combinaisons les plus efficaces.

Chapitre **4**

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

4.1 INTRODUCTION

Cette partie s'inscrit dans une démarche de formulation de bétons légers incorporant la diatomite comme composant principal, avec l'ajout de fibres dans le but d'en améliorer les propriétés. Dans ce chapitre, nous proposerons une analyse personnelle de plusieurs résultats expérimentaux, en mettant en évidence les tendances observées ainsi que leur signification sur le plan technique. Nous décrirons également les protocoles expérimentaux utilisés dans les études examinées, afin de mieux comprendre les conditions de réalisation des essais et l'interprétation des résultats obtenus.

4.2 CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES

4.2.1 OUVRABILITE

L'essai d'ouvrabilité du béton frais, également connu sous le nom d'essai d'affaissement au cône d'Abrams (slump-test), est une méthode normalisée (NF P 18-451) permettant d'évaluer la consistance et la maniabilité du béton. Le principal équipement utilisé est un moule en forme de tronc de cône, généralement fabriqué en tôle d'acier inoxydable ou en métal rigide, ayant une base de 20 cm, un sommet de 10 cm et une hauteur de 30 cm. L'essai requiert également une tige de compactage métallique de 16 mm de diamètre et environ 60 cm de long, ainsi qu'un support rigide et une règle de mesure.

La procédure consiste à remplir le cône en trois couches de béton, chacune représentant environ un tiers de la hauteur totale. Chaque couche est piquée 25 fois verticalement avec la tige pour assurer une compaction homogène. Une fois le cône rempli, il est retiré verticalement et lentement, sans vibration ni mouvement latéral, afin de ne pas perturber le béton. On mesure ensuite la différence de hauteur entre le sommet initial du cône et le point le plus élevé du béton affaissé : c'est la valeur du slump, exprimée en centimètres. Cette valeur indique le degré d'ouvrabilité du béton : plus l'affaissement est important, plus le béton est fluide.



Figure 4.1 Essai d'ouvrabilité au cône d'Abrams

Les tableaux 4.1 et 4.2 et la figure 4.2 ci-dessous représentent les résultats de l'essai pour le béton léger à base de diatomite et fibré :

Type de béton	BO	BD 25%	BD 50%	BD 75%	BD 100%
Affaissement (cm)	7,5	3	6	9	14

Tableau 4.1 Affaissement au cône d'Abrams du béton léger à base de diatomite

Type de béton	BOF	BDF 25%	BDF 50%	BDF 75%	BDF 100%
Affaissement (cm)	4	2	3,5	8,5	13.5

Tableau 4.2 Affaissement au cône d'Abrams du béton fibré léger à base de diatomite

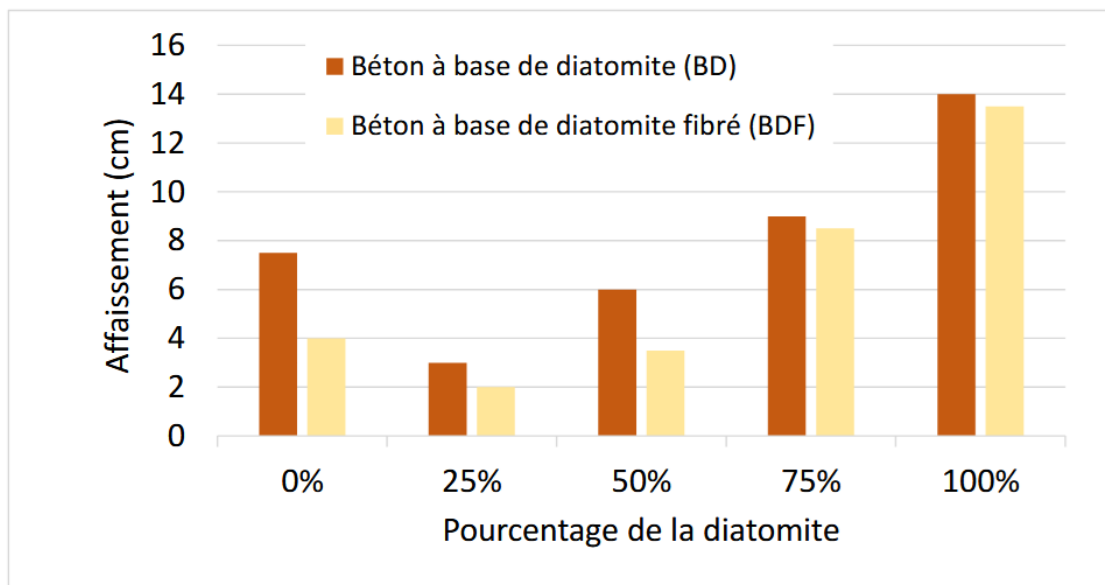


Figure 4.2 Affaissement au cône d'Abrams

On constate que le béton ordinaire présente un affaissement plus élevé que celui contenant 25% de diatomite en substitution. Cette différence peut être attribuée au forte capacité d'absorption

de la diatomite, nécessitant un apport supplémentaire en eau pour maintenir la maniabilité. Toutefois, à des pourcentages plus élevés de diatomite, le béton devient progressivement plus fluide, ce qui pourrait s'expliquer par une meilleure dispersion des particules, une adaptation progressive de la formulation, mais aussi par un ajout d'eau potentiellement excessif afin de compenser l'absorption accrue.

Cette évolution non linéaire de l'affaissement suggère que: À faible concentration (25%), la diatomite absorbe probablement une partie de l'eau du mélange, réduisant la fluidité. À concentration élevée (75-100%), les propriétés physiques de la diatomite (légèreté, porosité) modifient fondamentalement le comportement rhéologique du béton, augmentant sa fluidité. L'ajout de fibres réduit systématiquement l'affaissement (de 0,5 à 1 cm environ) par rapport aux formulations sans fibres, ce qui s'explique par l'effet de renforcement et d'enchevêtrement des fibres qui limitent la déformation du béton frais.

Aussi, lorsqu'on compare le béton contenant de la diatomite sans fibres au béton diatomite fibré, on constate que le premier présente un affaissement peu plus élevé. Cela indique que l'ajout de fibres dans le béton diatomite réduit sa fluidité en raison de l'effet de blocage des fibres sur le mouvement du mélange, ce qui limite sa capacité à s'écouler librement. Ces observations soulignent l'importance de l'interaction entre les fibres et les composants du béton dans le comportement rhéologique du matériau.

4.2.2 ESSAI RHEOLOGIQUE

Un rhéomètre coaxial de type vane a été utilisé pour mesurer les paramètres rhéologiques des mortiers (figure 4.3).



Figure 4.3 Le rhéomètre

L'appareil est équipé d'un agitateur piloté par logiciel et d'un récipient de 13 cm de hauteur et de 10 cm de diamètre avec des baguettes parallèlement disposées à leur axe pour réduire le risque de glissement du matériau étudié. La pâle utilisée pour le cisaillement est composée de deux plaques perpendiculaires de dimensions 5x10 cm

Les mesures rhéologiques ont été prises durant la phase décroissante des vitesses et ceci dans le but de s'affranchir du comportement et des propriétés dépendantes du temps telle que la thixotropie et aussi pour tester les mortiers dans un état suffisamment déstructuré.

Le profil de vitesse choisi est composé de 8 paliers de 20 s à des vitesses de rotation allant de 227 rpm à 17 rpm, précédés d'un palier de 110 secondes de pré-cisaillement à la vitesse maximale de 257 rpm afin d'effacer l'historique de cisaillement précédent et la mémoire d'une structure initiale. Pour chaque palier de vitesse, 20 mesures du couple sont effectuées.

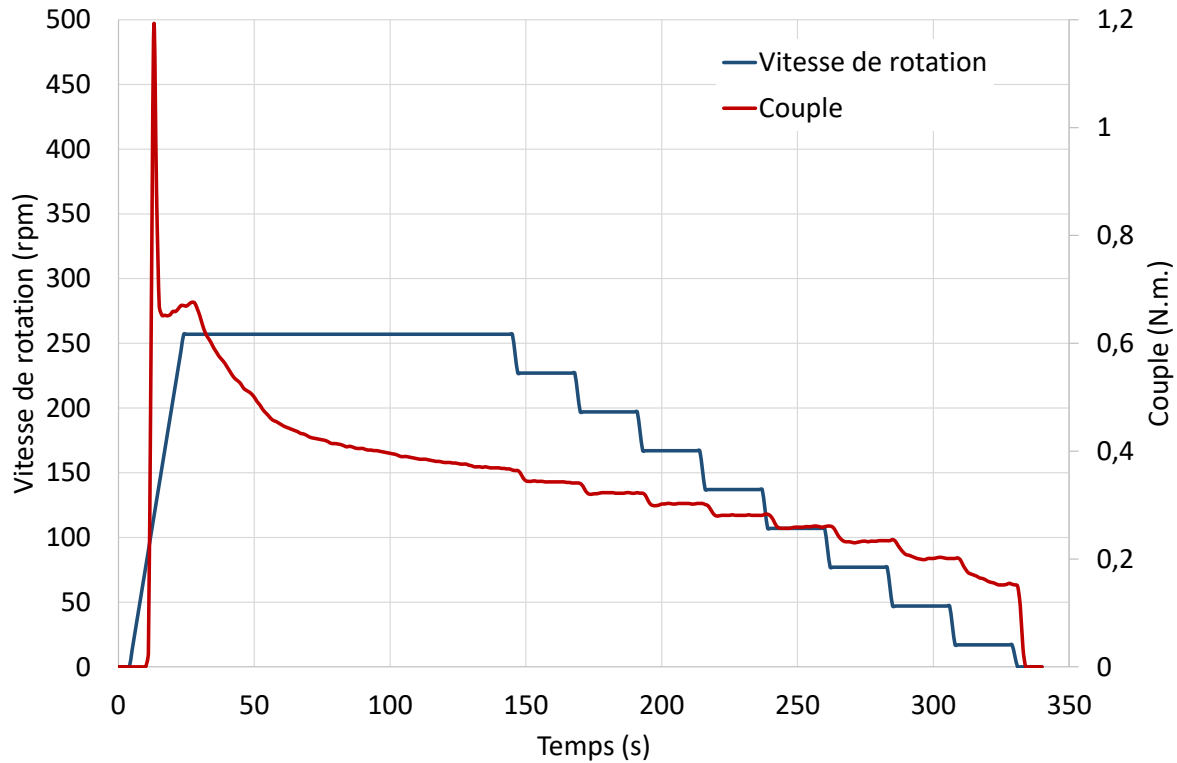


Figure 4.4 courbe représente vitesse de rotation et couple

L'essai rhéologique comprend les phases suivantes :

- **Phase 1 :** Mesure des couples à vide qui correspondent aux couples imposés pour maintenir les vitesses lorsque le récipient est vide ;
- **Phase 2 :** Remplissage du mortier dans le récipient ;
- **Phase 3 :** Positionnement de la pale en l'immergeant dans le mélange jusqu'à être placée à niveau avec la couche supérieure du mortier : elle repose ainsi sur une couche en mortier de 3cm d'épaisseur ;
- **Phase 4 :** Mesure des couples totaux qui correspondent aux couples imposés pour maintenir les vitesses lorsque le récipient est rempli de béton ;
- **Phase 5 :** Calcul des couples finaux en déduisant les couples à vide des couples totaux, pour chaque palier de vitesse ;
- **Phase 6 :** Exploitation des mesures et calculs des paramètres rhéologiques.

Les calculs des paramètres rhéologiques en été calculé en utilisant les lois de passage développés par Estellé et col. (2009) [59].

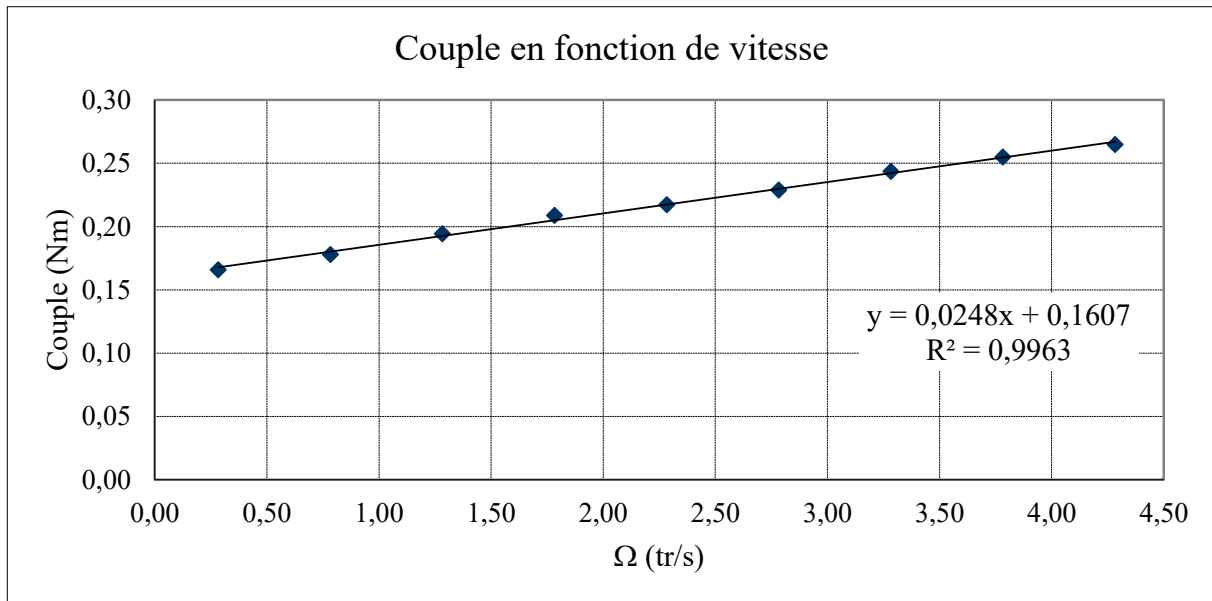


Figure 4.5 Relation entre la vitesse et le couple de cisaillement

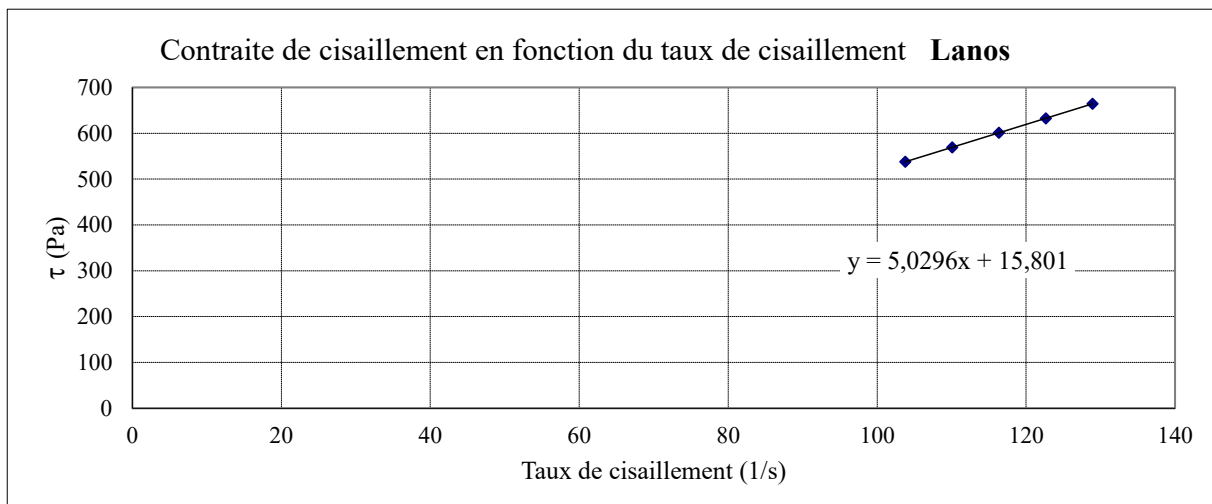


Figure 4.6 Relation entre le taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement des MBE
Cas du MBE fibré avec 100% de diatomite

Les paramètres rhéologiques ont été obtenus grâce aux lois de passage de Estellé et col. On constate que le comportement de ces mortiers de béton équivalent suit le modèle rhéologique de **Bingham**. Cela signifie qu'ils se comportent comme des fluides viscoplastiques :

- Ils nécessitent une contrainte minimale (appelée seuil de cisaillement) pour commencer à s'écouler.
- Une fois ce seuil franchi, leur vitesse de déformation augmente proportionnellement à la contrainte appliquée, selon une viscosité plastique constante.

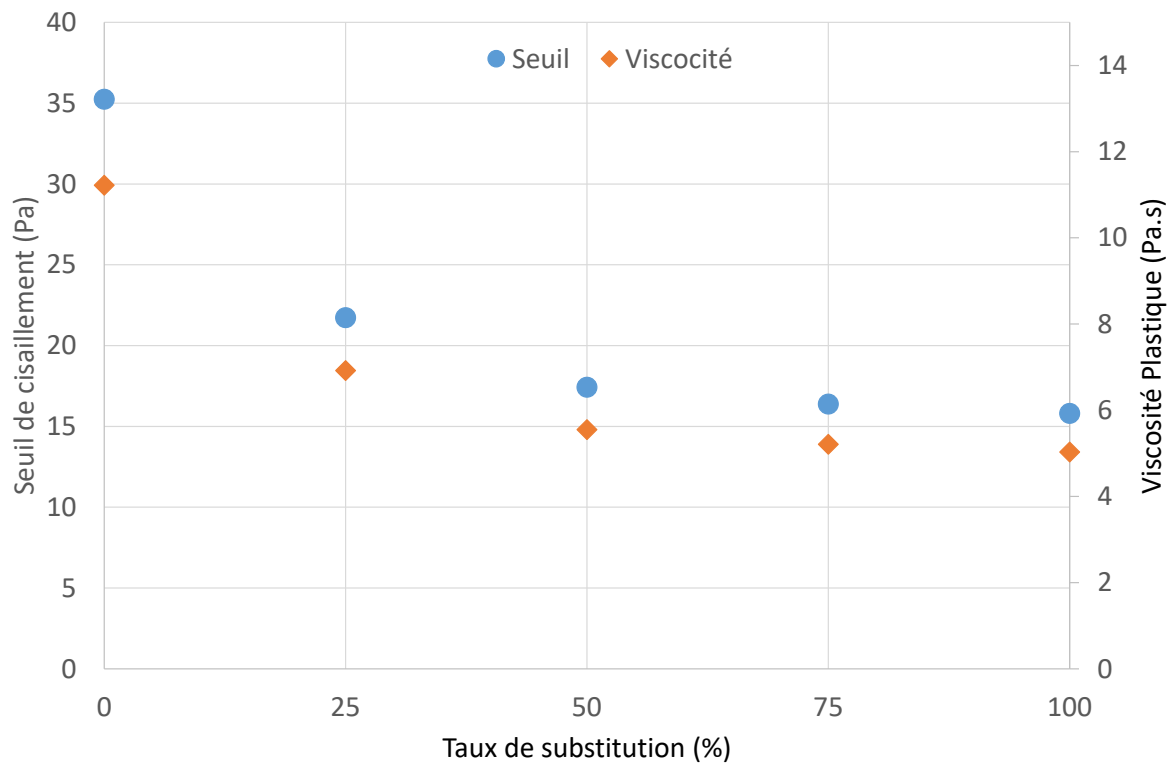


Figure 4.7 courbe représente le seuil et la viscosité de béton diatomite

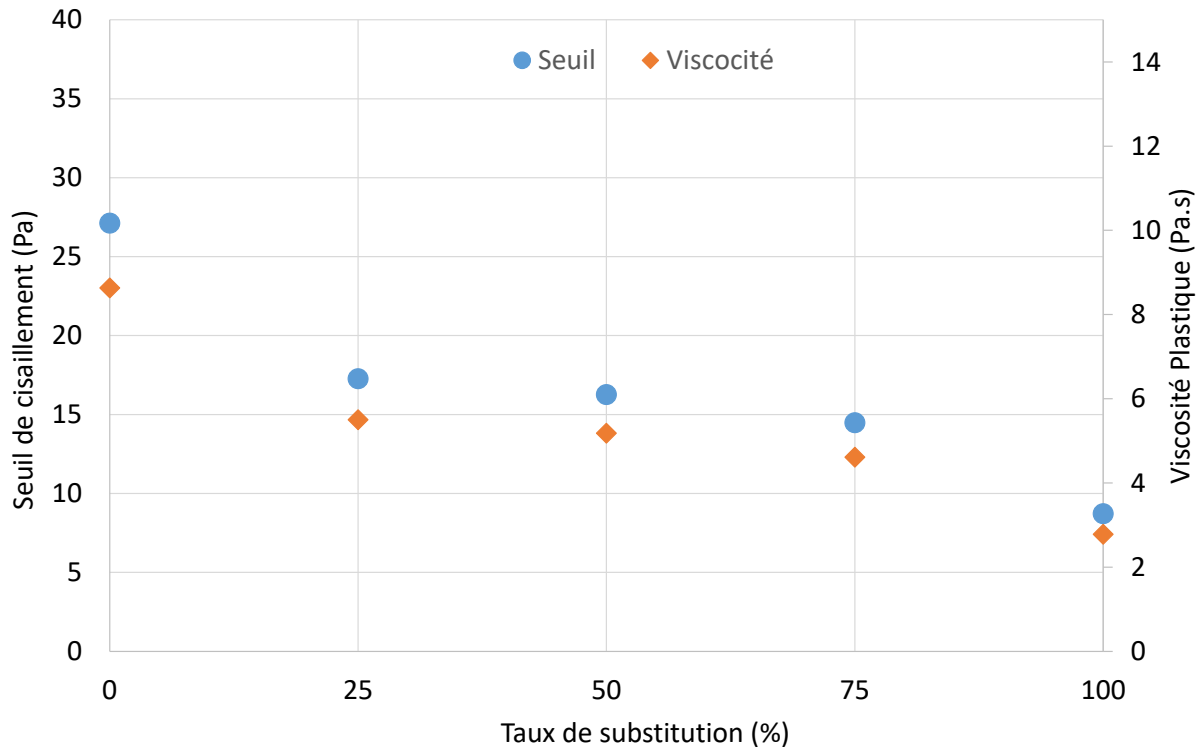


Figure 4.8 courbe représente le seuil et la viscosité de béton diatomite fibré

La substitution des granulats par la diatomite a permis de réduire les seuils de cisaillement et la viscosité. Cela signifie que le MBE est devenu plus fluide et plus facile à mettre en place, nécessitant moins d'énergie pour s'écouler. La diatomite, matériau léger et poreux, peut agir comme un agent lubrifiant au niveau microscopique, réduisant ainsi la résistance interne au mouvement du mélange. Cette amélioration rhéologique peut favoriser la pompabilité et le remplissage des moules ou coffrages.

4.3 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

4.3.1 DENSITE

Le béton léger à base de diatomite se caractérise par une densité nettement inférieure à celle du béton ordinaire, en raison de la structure poreuse et du faible poids spécifique de la diatomite. En général, la densité sèche du béton ordinaire varie entre 2200 et 2400 kg/m³, tandis que celle du béton léger à base de diatomite se situe souvent entre 1000 et 1600 kg/m³ selon la formulation.

Dans notre prospection, l'ensemble des éprouvettes, correspondant aux différentes formulations de béton, a fait l'objet d'une pesée précise. À partir des masses mesurées et des volumes théoriques, les densités apparentes ont été calculées et sont synthétisées dans le tableau 4.3 ci-après.

Type de béton	BO (BOF)	BD 25% (BDF25%)	BD 50% (BDF50%)	BD 75% (BDF75%)	BD 100% (BDF100%)
Densité	2,397	2,132	1,825	1,575	1,256

Tableau 4.3 Densité des différents types de bétons de diatomite formulés

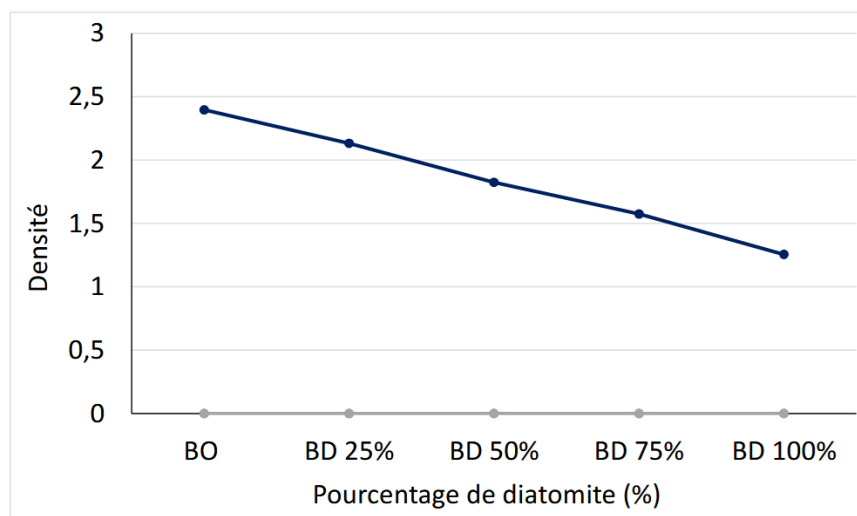


Figure 4.9 Densité des différents types de bétons

Les densités obtenues sont en cohérence avec les valeurs rapportées dans la littérature. La diminution progressive de la densité avec l'augmentation du taux de diatomite s'explique par la faible masse volumique de cette dernière (environ 500 kg/m³), nettement inférieure à celle des granulats traditionnels. De plus, sa structure poreuse contribue à alléger la matrice cimentaire, ce qui justifie cette tendance observée. Ces résultats sont en accord avec les données rapportées dans la littérature.

4.3.2 ANALYSE MICROSTRUCTURALE

L'analyse microstructurale permet de mieux comprendre l'influence de la diatomite et des fibres sur la matrice cimentaire. Elle est réalisée à l'aide du microscope électronique à balayage (MEB), qui permet d'observer la morphologie, la compacité, ainsi que la distribution des pores et des phases. Les figures 4.10 à 4.12 présentent les micrographies obtenues par microscopie électronique pour le bétons ordinaire, fibré et non fibrés, ainsi que pour le béton à base de diatomite avec une substitution totale (100 %), fibré et non fibré.

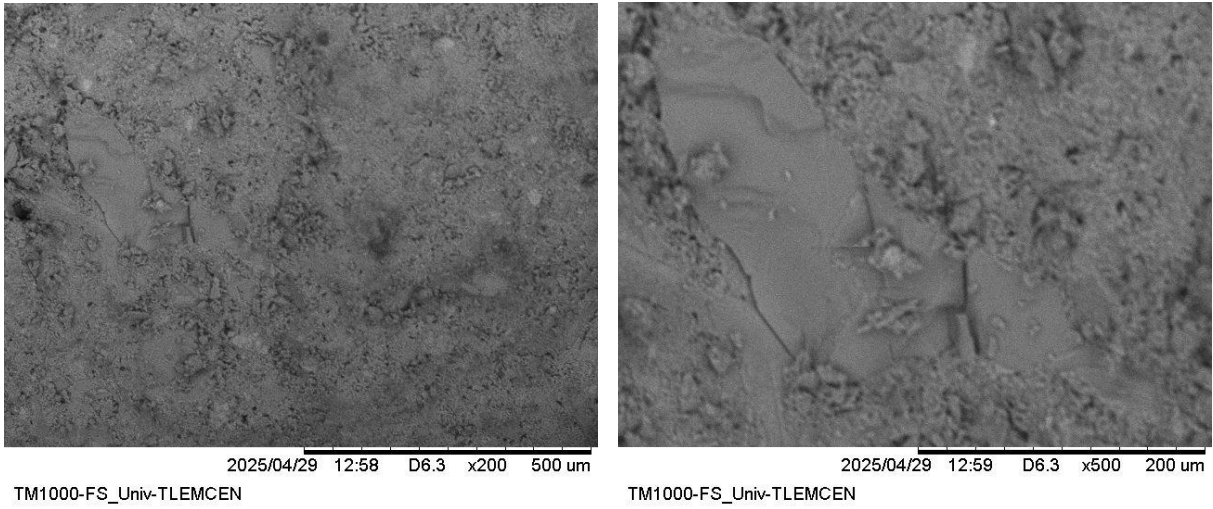


Figure 4.10 Microstructure du béton ordinaire ($\times 200$, $\times 500$)

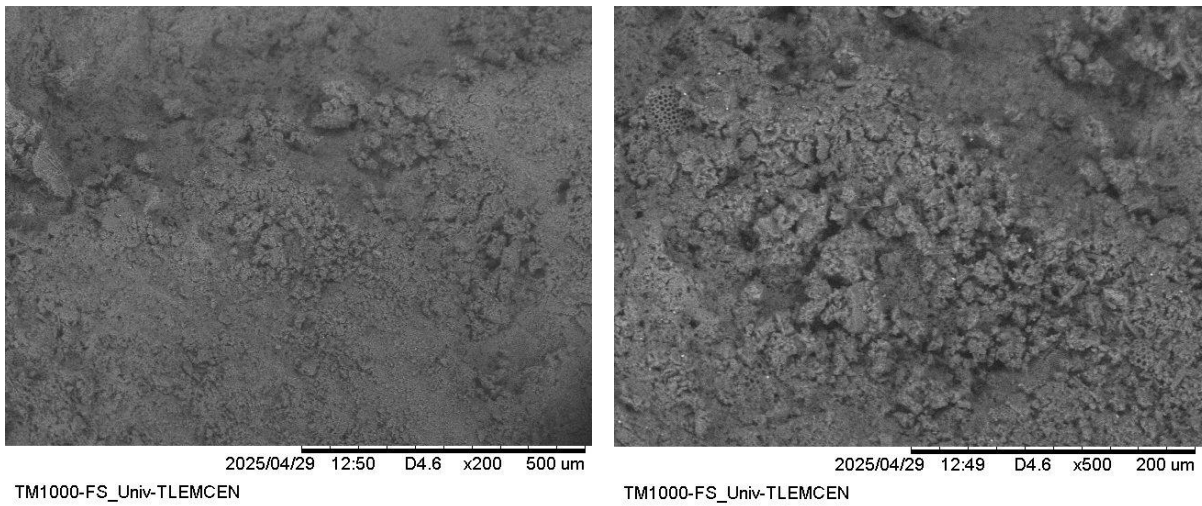
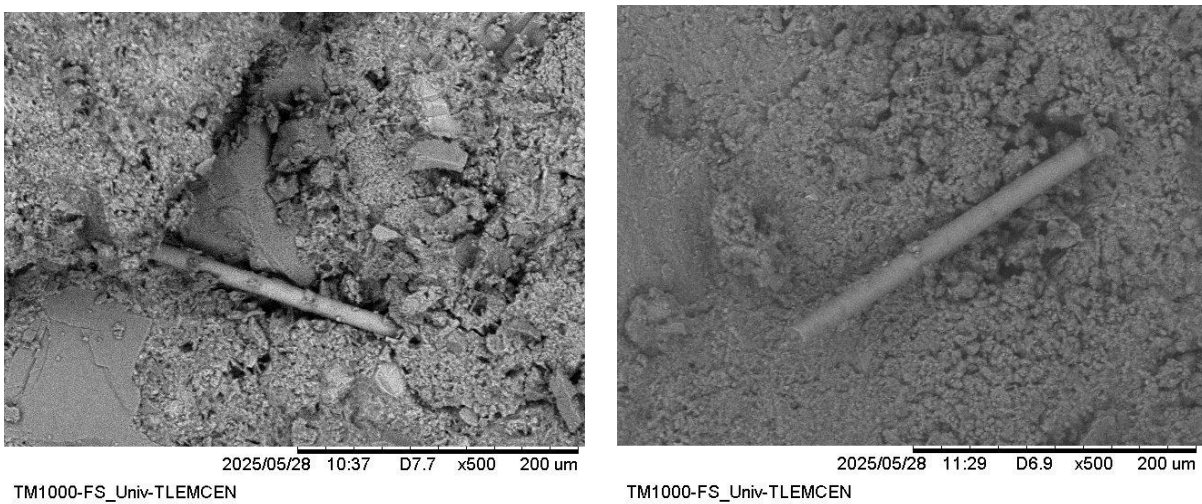


Figure 4.11 Microstructure du béton diatomite 100% ($\times 200$, $\times 500$)



(a) Béton ordinaire fibré

(b) Béton de diatomite fibré

Figure 4.12 Microstructure du béton ordinaire et fibré ($\times 500$)

Les photos de microscopie du béton ordinaire montrent une microstructure dense et sans trous visibles, ce qui traduit une faible porosité et une bonne compacité du matériau. En comparaison, le béton contenant 100 % de diatomite présente de nombreux trous visibles, indiquant une porosité élevée. Cette porosité importante peut réduire la résistance et la durabilité du béton à base de diatomite par rapport au béton ordinaire.

L'ajout de fibres aide à limiter les fissures dans les deux types de béton. Les fibres agissent comme des petits liens qui tiennent les fissures fermées, ce qui rend le béton plus solide et plus résistant. Cependant, dans le béton à base de diatomite, les fibres sont moins efficaces, car ce béton est très poreux. La porosité trop élevée réduit leur capacité à bien jouer leur rôle.

4.4 CARACTERISTIQUES MECANQUES

4.4.1 RESISTANCE A LA COMPRESSION

La résistance à la compression constitue l'une des propriétés mécaniques les plus significatives du béton, car elle permet d'évaluer globalement sa qualité et sa durabilité. Elle est directement influencée par la microstructure de la pâte de ciment hydratée, que ce soit à court ou à long terme.

L'évaluation de cette résistance dans le cas du béton léger est réalisée selon la norme (EN 12390-3), à l'aide d'éprouvettes cylindriques standardisées de dimensions $\phi 11 \times 22 \text{ cm}^3$. Ces échantillons sont soumis à un essai de compression sur une presse mécanique, jusqu'à la rupture, afin de déterminer la contrainte maximale que le matériau peut supporter. Après cela le calcul de la résistance s'effectue à partir de la formule suivante :

$$R_c = \frac{F}{S}$$

Avec : R_c : la résistance du béton (KN)

F : la force (KN/m²)

S : la surface soumise à la force (m²)

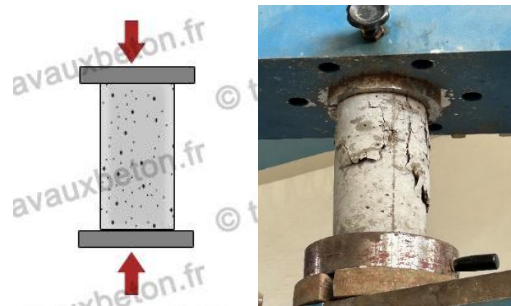


Figure 4.13 Essai de compression

Les résultats de la résistance à la compression à 28 jours des différents bétons légers figurent dans les tableaux 4.4 et 4.5 et la figure 4.14 qui suivent. Chaque valeur présentée correspond à la moyenne obtenue sur deux éprouvettes pour chaque type de béton.

Type de béton	BO	BD 25%	BD 50%	BD 75%	BD 100%
Force (KN)	251,350	136,014	77,309	40,385	17,319
R_c (KN/m ²)	26,762	14,319	8,138	4,251	1,823

Tableau 4.4 Résistance à la compression à 28 jours du béton léger à base de diatomite

Type de béton	BOF	BDF 25%	BDF 50%	BDF 75%	BDF 100%
Force (KN)	245,595	121,420	72,819	44,756	19,100
R_c (KN/m ²)	25,960	12,743	7,665	4,711	2,010

Tableau 4.5 Résistance à la compression à 28 jours du béton fibré léger à base de diatomite

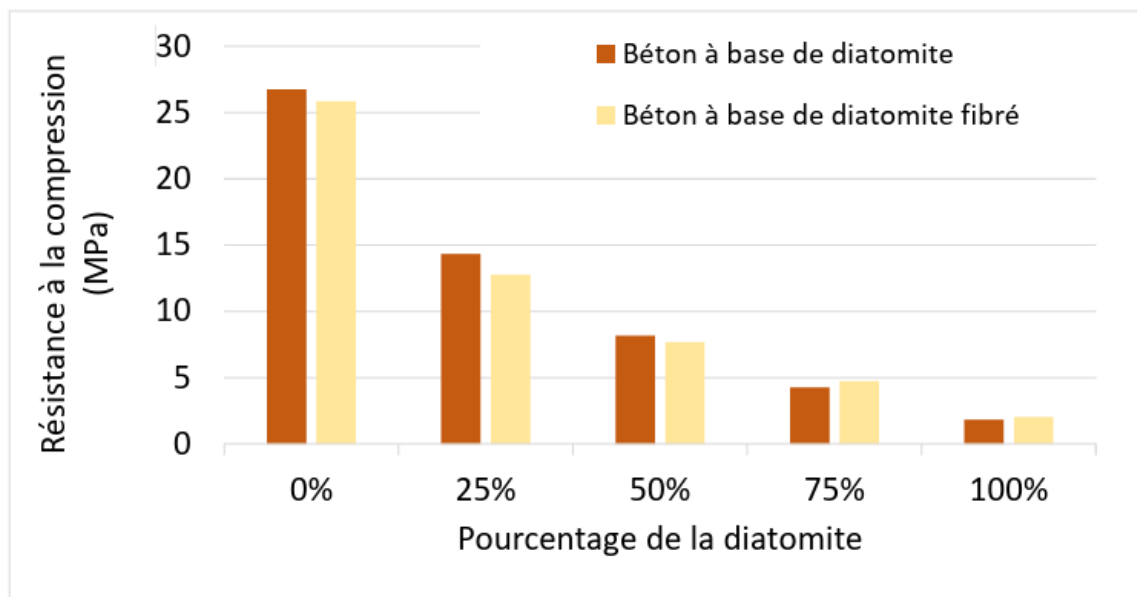


Figure 4.14 Résistance à la compression à 28 jours pour différents types de béton

On constate que le béton léger à base de diatomite présente une résistance à la compression nettement inférieure à celle du béton ordinaire, en raison de la faible densité et de la forte porosité de la diatomite. Par ailleurs, l'ajout de fibres dans le béton léger à base de diatomite n'entraîne pas une amélioration significative de la résistance à la compression, ce qui suggère que l'effet des fibres est limité dans une matrice aussi poreuse et peu résistante. Plus le pourcentage de diatomite augmente, plus la résistance à la compression diminue, que ce soit

pour le béton simple ou fibré. Pour le béton sans fibres, la résistance passe de 26,76 MPa (0% diatomite) à seulement 1,82 MPa (100% diatomite). Pour le béton fibré, elle passe de 25,96 MPa à 2,01 MPa. L'ajout de fibres améliore légèrement la résistance à la compression à chaque taux de diatomite, mais cet effet reste modeste. À 0% de diatomite, le gain est faible (26,76 → 25,96 MPa, soit une légère diminution). À 100% de diatomite, la résistance passe de 1,82 à 2,01 MPa, soit une augmentation relative de 10%.



Figure 4.15 Aspect des éprouvettes suite à l'essai de compression

4.4.2 RESISTANCE A LA FLEXION

L'essai de flexion a pour objectif d'évaluer la capacité du béton à résister à une contrainte de traction en surface. Pour cela, des éprouvettes prismatiques de dimensions $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ sont soumises à une charge en flexion à l'aide d'une presse adaptée. La résistance à la flexion est déterminée à partir de la charge maximale enregistrée. L'essai est réalisé à 28 jours de cure, et la valeur finale est obtenue en faisant la moyenne des résultats de deux éprouvettes par formulation. Les valeurs sont calculées à l'aide de la formule ci-dessus :

$$R_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

Avec : R_f : résistance à la flexion (en MPa)

F : charge maximale appliquée (en N)

L : portée entre appuis (en mm) : 210 mm

b : largeur de l'éprouvette (en mm) : 70 mm

h : hauteur (ou profondeur) de l'éprouvette (en mm) : 70 mm

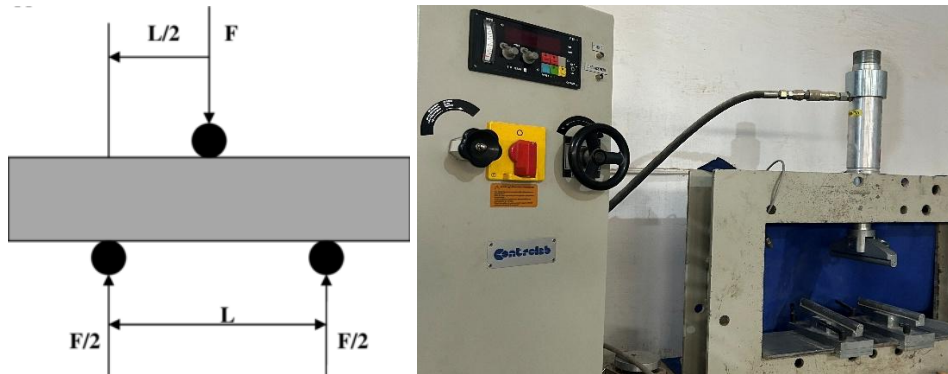


Figure 4.16 Essai de flexion

Les résultats de la résistance à la flexion à 28 jours des différents types de bétons figurent dans les tableaux 4.6 et 4.7 et la figure 4.17 qui suivent :

Type de béton	BO	BD 25%	BD 50%	BD 75%	BD 100%
R_f (KN/m ²)	6,89	4,49	2,38	2,04	1,37

Tableau 4.6 Résistance à la flexion à 28 jours du béton léger à base de diatomite

Type de béton	BOF	BDF 25%	BDF 50%	BDF 75%	BDF 100%
R_f (KN/m ²)	7,79	5,11	3,86	1,98	1,11

Tableau 4.7 Résistance à la flexion à 28 jours du béton fibré léger à base de diatomite

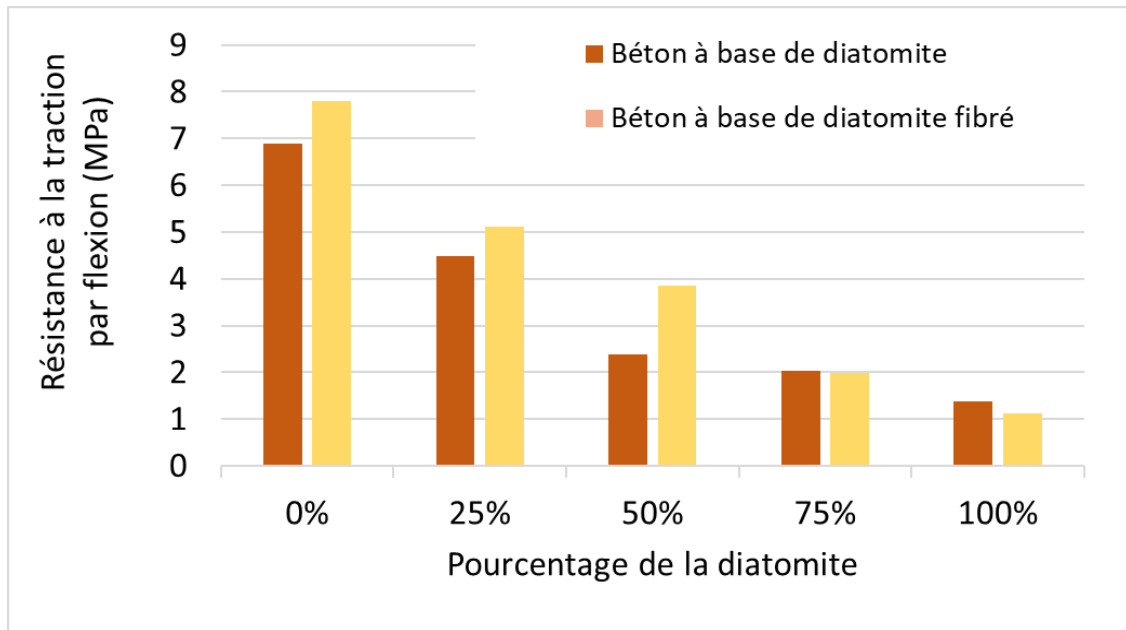


Figure 4.17 Résistance à la flexion



Figure 4.18 Aspect des éprouvettes suite à l'essai de flexion

Le test de flexion a montré que le béton avec des fibres est plus résistant que celui sans fibres. Les fibres permettent de limiter les fissures et rendent le béton plus souple. Cependant, lorsque 50 % du béton est remplacé par de la diatomite, la résistance devient presque identique avec ou sans fibres. Et avec 75 % ou 100 % de diatomite, le béton avec fibres est même légèrement moins résistant. Ce résultat s'explique par la forte proportion de diatomite, un matériau poreux et friable, dont la faible cohésion limite l'efficacité des fibres en tant qu'éléments de pontage des fissures.

0% diatomite : Le béton fibré (7,79 kN/m²) est plus résistant que le béton sans fibres (6,89 kN/m²).

25% diatomite : Béton fibré (5,11) > Béton sans fibres (4,49).

50% diatomite : Béton fibré (3,86) > Béton sans fibres (2,38).

75% diatomite : Béton fibré (1,98) ≈ Béton sans fibres (2,04) (légère baisse pour le fibré).
 100% diatomite : Béton fibré (1,11) < Béton sans fibres (1,37) (le fibré devient moins performant). L'ajout de fibres améliore la résistance à la flexion pour des taux de diatomite jusqu'à 50%. Au-delà, l'effet positif des fibres diminue voire s'inverse, probablement à cause de la trop grande porosité et de la faible cohésion de la matrice.

4.4.3 ESSAI ULTRASON

L'essai par ultrasons est une technique non destructive utilisée pour évaluer la qualité interne du béton, notamment son homogénéité, sa compacité et, de manière indirecte, sa résistance mécanique. Il consiste à placer un émetteur et un récepteur d'ondes ultrasonores de part et d'autre de l'éprouvette, puis à mesurer le temps nécessaire au signal pour traverser le matériau, ce qui permet de calculer la vitesse de propagation des ondes à travers le béton.

L'essai a été réalisé sur deux éprouvettes de (φ11×22 cm³) pour chaque type de béton. Les tableaux ci-dessus présentent les vitesses de propagation moyennes ainsi que les temps de transit mesurés.

$$E = \rho \cdot V_L^2 \cdot \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

- Avec : *E* : Module d'élasticité (en GPa)
- V_L* : Vitesse de propagation (en m/s)
- ν* : Coefficient de poisson : tiré de la littérature pour les calculs
- ρ* : Masse volumique absolue (en Kg/m³)

Type de béton	BO	BD 25%	BD 50%	BD 75%	BD 100%
Temps (μs)	46,2	56,4	66	79,6	124,7
Vitesse V _L (m/s)	4761	3900	3333	2763	1764
Coefficient de Poisson ν	0,23	0,21	0,19	0,17	0,15
Module d'élasticité E (GPa)	46,85	28,85	18,46	11,18	3,71

Tableau 4.8 Mesures à l'ultrason du béton léger à base de diatomite

Type de béton	BOF	BDF 25%	BDF 50%	BDF 75%	BDF 100%
Temps (μs)	44,6	55,4	65,2	97,2	134,6
Vitesse (m/s)	4932	3971	3374	2263	1634
Coefficient de Poisson ν	0,23	0,21	0,19	0,17	0,15

Module d'élasticité E (GPa)	50,31	29,87	18,94	7,50	3,91
-----------------------------	-------	-------	-------	------	------

Tableau 4.9 Mesures à l'ultrason du béton léger à base de diatomite fibré

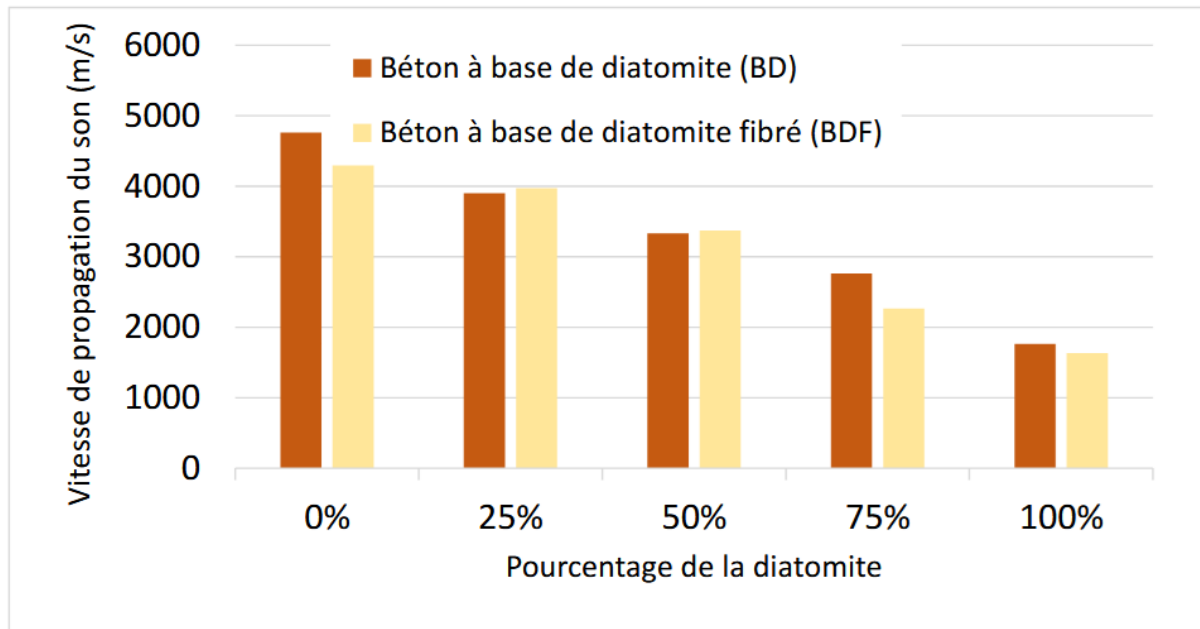


Figure 4.19 Vitesses de propagation des ondes pour différentes formulations

Plus la quantité de diatomite dans le béton augmente, plus le temps de passage des ondes ultrasonores s'allonge et la vitesse de propagation diminue. Cela montre une perte progressive de compacité et d'homogénéité. Les vitesses très faibles et les grandes différences entre échantillons indiquent une structure très irrégulière, voire détériorée. On peut donc dire que l'ajout excessif de diatomite augmente la porosité et diminue la résistance du béton.

Entre 0% et 100% de diatomite : Temps de propagation : +33,4 μ s (+72%) Vitesse : -3298 m/s (-66,8%) Coefficient de Poisson : -0,08 (-34,8%) Module d'élasticité : -46,4 GPa (-92,2) .

En parallèle, on observe aussi une diminution progressive du module d'élasticité. Cette baisse confirme que le béton devient plus déformable et moins rigide à mesure que la teneur en diatomite augmente. Cela traduit une perte de performances mécaniques du matériau.

4.5 CONCLUSION

L'ajout de diatomite change plusieurs propriétés du béton. Le béton ordinaire a un affaissement plus fort que celui avec 25 % de diatomite. Cela vient de l'absorption d'eau par la diatomite, qui demande plus d'eau dans la recette. À plus forte dose, le béton devient plus fluide, car les

particules se dispersent mieux et on ajoute souvent plus d'eau. Les fibres réduisent la fluidité du béton à cause de leur effet blocage.

La densité baisse quand on met plus de diatomite. Cela s'explique par sa faible masse volumique et sa porosité. La microstructure du béton ordinaire est dense, celle avec 100 % de diatomite est très poreuse. Cette porosité affaiblit la résistance et la durabilité. Les fibres limitent les fissures, mais elles sont moins efficaces dans le béton poreux.

La résistance à la compression du béton diatomite est plus faible que celle du béton ordinaire. Les fibres n'améliorent pas vraiment cette résistance dans le béton diatomite. En flexion, les fibres renforcent le béton ordinaire, mais pas quand la diatomite dépasse 50 %. Là, le béton devient friable et les fibres ne jouent plus bien leur rôle.

Les ondes ultrasonores passent plus lentement quand il y a plus de diatomite. Cela montre que le béton perd sa compacité et devient irrégulier. Le module d'élasticité diminue aussi, ce qui veut dire que le béton devient moins rigide et plus souple. En résumé, trop de diatomite nuit à la qualité et à la résistance du béton.

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire a porté sur la formulation et l'analyse de bétons légers utilisant la diatomite, un matériau naturel, léger et très poreux. L'objectif principal était d'étudier les effets de l'intégration de la diatomite, avec ou sans fibres, sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du béton. Malgré le manque de certains essais expérimentaux à cause de contraintes de temps, l'étude bibliographique et les essais réalisés ont permis de tirer des conclusions importantes.

Le béton léger présente plusieurs avantages, notamment sa masse réduite, qui permet d'alléger les structures. Ce type de béton est donc particulièrement adapté aux projets de rénovation ou aux constructions sur des structures anciennes ou fragiles. L'introduction de la diatomite dans la formulation du béton permet de réduire encore plus la densité du mélange, ce qui facilite la mise en œuvre et diminue les charges permanentes sur les bâtiments.

La diatomite, grâce à sa faible masse volumique et sa structure poreuse, améliore les performances thermiques du béton et offre de bonnes propriétés isolantes. Elle est aussi un matériau naturel, disponible localement, ce qui représente un avantage en termes de coût et d'impact environnemental. Cependant, sa porosité élevée rend le béton plus fragile mécaniquement, surtout à forte teneur. D'où l'importance de bien contrôler le dosage et la formulation.

La présence de fibres dans le béton joue un rôle important. Elles réduisent les fissures, améliorent la tenue à la flexion et prolongent la durabilité du matériau. Toutefois, leur effet devient limité dans un béton trop poreux. Dans les bétons à forte teneur en diatomite, les fibres n'arrivent pas à jouer pleinement leur rôle, car la structure manque de cohésion. Leur efficacité est donc fortement liée à la qualité de la matrice.

Les résultats expérimentaux montrent aussi que l'affaissement varie avec le taux de diatomite. À faible teneur, la maniabilité diminue à cause de l'absorption d'eau. Mais à forte teneur, le mélange devient plus fluide, souvent à cause d'un excès d'eau ajouté pour compenser cette absorption. La densité diminue progressivement avec l'augmentation de la diatomite, mais en contrepartie, la résistance à la compression et à la flexion chute.

Les essais par ultrasons montrent une baisse de la vitesse de propagation des ondes et une augmentation du temps de transit, traduisant une perte de compacité. Le module d'élasticité diminue également, ce qui signifie que le béton devient plus souple, moins rigide et donc

mécaniquement moins performant. Ces résultats confirment que l'ajout excessif de diatomite détériore la structure interne du béton.

En conclusion, la diatomite est un matériau intéressant pour la fabrication de béton léger, surtout lorsqu'elle est utilisée à des taux modérés. Elle permet d'obtenir un béton plus isolant et plus léger, adapté à certaines applications comme les dalles de couverture, les toitures, les cloisons ou les planchers techniques. Cependant, pour garantir de bonnes performances, il est indispensable de bien adapter la formulation, de maîtriser les dosages, et de limiter son usage à des éléments non structurels ou faiblement sollicités mécaniquement.

À l'issue de ce travail, les perspectives suivantes sont proposées :

- Compléter les essais en laboratoire : approfondir les tests mécaniques, de durabilité et thermiques.
- Tester d'autres fibres : comparer l'effet de fibres métalliques, synthétiques ou naturelles.
- Étudier le comportement dans le temps : observer le retrait, le vieillissement et la tenue au gel.
- Analyser la résistance au feu : évaluer la performance thermique en cas d'incendie.
- Faire des tests en conditions réelles : appliquer le béton diatomite sur chantier.
- Associer la diatomite à d'autres matériaux verts : comme les déchets recyclés ou les fibres végétales.
- Optimiser la formulation : pour trouver un bon équilibre entre légèreté, résistance et isolation.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. Haddouri dhikra, Les bétons légers et très légers : Formulation, caractérisation et applications, Université du 08 mai 1945 de Guelma, Faculté des sciences et de la Technologie, 2024.
- [2]. Lamprecht h.-o. opus caementitium : bautechnik der römer. 5e éd. beton-verlag gmbh; düsseldorf, allemagne ,1996. p. 264.
- [3]. Chandra s., berntsson l. béton léger. Ire éd. noyes publications ; norwich, Royaume-uni : 2002. p. 450.
- [4]. Institut de l'argile et de l'ardoise expansées. histoire du béton léger, applications et économie. institut de l'argile et de l'ardoise expansées (escsi) ; salt lake city, utah, Etats-unis , 1971.
- [5]. Raithby kd, lyndon fd. béton léger dans les ponts routiers. int. j. cem. compos. béton léger. 1981;3:133–146. doi: 10.1016/0262-5075(81)90007-5.
- [6]. Thienel k.-c., peck m. die renaissance leichter betonne in der architektur. détail. 2007 ; 47 : 522-534
- [7]. Norme Nf en 206 novembre 2014, béton - spécification, performances, production et conformité.
- [8]. Daniel montharry (auteur), michel platzer, la technique du bâtiment tous corps d'état relié, éditions du moniteur, 2014.
- [9]. Article ,le béton léger, infociments, olvier baumann,2024.
- [10]. Norme Nf en iso 9229 septembre 2007, isolation thermique – vocabulaire.
- [11]. Jean-Marie Pierre, informations lexicographiques [archive] et étymologiques [archive] de « ponce » dans le trésor de la langue française informatisé, sur le site du centre national de ressources textuelles et lexicales 2015).
- [12]. Rocher ph memento roches et minéraux industriels, ditomite,ministere de l'industrie, de la poste et des telecommunications,1995
- [13]. G. dreux & j. festa , constituants du béton, leurs caractéristiques, le choix du ciment et les nouvelles normes,1998]
- [14]. G. neville, Properties of Concrete ,2000
- [15]. Dreux & j. festa , constituants du béton, leurs caractéristiques, le choix du ciment et les nouvelles normes,1998
- [16]. M Yakoub,le béton de fibres, partie revue bibliographique,2009.
- [17]. Article,bétons fibrés,infociment, auteur patrick guiraud,2018

- [18]. Daniel montharry (auteur), michel platzter, la technique du bâtiment tous corps d'état relié, éditions du moniteur, 2014
- [19]. Les fibres pour renforcer le béton, anne laure durand, bronzo perasso, 2023
- [20]. United state geological survey, février 2014
- [21]. H. meradi, l. atoui, k. labiod, k. boubendira, s. benayache, f. aouadja, caractérisation de diatomite d'origine algérienne pour l'isolation thermique, (2014)
- [22]. Olivier dequincey, des volcans du massif central aux prix nobel et à la bière, une roche peu connue aux usages insoupçonnés : la diatomite, laboratoire de géologie de lyon / ens de lyon, 2019
- [23]. S Ben Messaoud, analyse des bétons légers incorporant de la diatomite pour l'allègement structurel, article technique, 2018.
- [24]. Article, la terre de diatomées dans la construction et la production de briques, produit écologique, 2022.
- [25]. S Hadri, mortier ou béton à hautes performances, université de guelma, 2012.
- [26]. Bouderouz.ae, daghache.a, etude des caractéristiques d'un béton cellulaire à base d'un sable préparé, 2016
- [27]. D. kastis, g. kakali, s. tsivilis, and m. g. stamatakis, "properties and hydration of blended , 2023
- [28]. Léa ordener, slump, cône d'abrams : les contrôles qualité sur béton frais , 2021
- [29]. Haddouri dhikra , l'université du 08 mai 1945 de guelma faculté des sciences et de la technologie , les bétons légers et très légers : formulation, caractérisation et applications , 2024
- [30]. O.taleb, f. ghomari, m. a. boukli hacene, e-h. kadri, h.soualhi, effet du dosage en superplastifiant sur les caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants, nature technology journal, vol. a: fundamental and engineering sciences, 2018
- [31]. Posi, s. lertnimoolchai, v. sata, and p. chindaprasirt, "pressed lightweight concrete containing calcined diatomite aggregate," constr. build. mater, 2013
- [32]. Sarıdemir mustafa, c, elikten serhat, yıldırım ahmet. mechanical and microstructural properties of calcined diatomite powder modified high strength mortars at ambient and high temperatures. 2020
- [33]. Degirmenci n, yilmaz a, use of diatomite as partial replacement for portland cement in cement mortars, 2009
- [34]. Aydin ac, gu" l r. influence of volcanic originated natural materials as additives on the setting time and some mechanical properties of concrete, 2007

- [35]. T. calais, propriétés mécaniques et durabilité d'un béton léger, 2013
- [36]. Cement and concrete composites | journal - sciencedirect.com
- [37]. Les bétons légers et très légers: formulation caractérisation et applications, haddouri dhikara, l'université 08 mai 1945 de Guelma, 2024
- [38]. Evaluation non destructive des propriétés d'un béton allégé par ultrason et tomographie x, agnès zamboni, zoubir mehdi sbartaï, nadia saïouri, université de bordeaux, umr 5293, cnrs, 351 cours de la libération, 33405 talence cedex
- [39]. Article, le béton léger, infociments, Olivier Baumann, 2024
- [40]. Article, béton léger : atouts, applications, méthodes de fabrication et prix, décoffrage du groupe vicat, 2025.
- [41]. Les bétons légers et très légers: formulation caractérisation et applications, haddouri dhikara, l'université 08 mai 1945 de Guelma, 2024
- [42]. Article, béton léger : atouts, applications, méthodes de fabrication et prix, décoffrage du groupe vicat, 2025
- [43]. Fiche technique ciment- giga béton (groupe industriel des ciments d'Algérie)
- [44]. Sika® visocrete®-4037 rmx - sika el djazair, Article.
- [45]. Sika® visocrete®-5067 rmx - sika el djazair, avril 2024.
- [46]. Sika El Djazair SPA, Sika visocret 522 rmx - vcm bat, Article.
- [47]. M. GHOMARI F, Mme BENDI-OUIS A, université aboubekr belkaid faculté des sciences de l'ingénieur département de génie civil, science des matériaux de construction travaux pratiques, 2007-2008.
- [48]. Mme Boutahir Bencheikh M, cours de mécanique des sols, université ou école d'ingénieurs (document pédagogique interne), université du 8 mai 1945 Guelma.
- [49]. Filab- Laboratoire d'analyse et d'expertises, analyse granulométrique – détermination de la distribution granulométrique par tamisage, Article.
- [50]. Wikipédia. *analyse granulométrique*. wikipédia, l'encyclopédie libre.
- [51]. Méthode de dreux- gorisse - ops.univ-batna2.dz
- [52]. Cimbéton, bétons - formulations des bétons courants, janvier 2013.
- [53]. Formulation des bétons : méthode de dreux-gorisse, université de Batna.
- [54]. Pr.M.N. Oudjit-k. Arroudj-A. Zenati et K. Abdelli, composition du béton par la méthode dreux-gorisse – usthb.
- [55]. Abdelkhalek Bouziane, formulation de béton - méthode de dreux gorisse – youtube, 2024.
- [56]. Patrick Guiraud, les granulats pour béton – infociments, février 2018.

- [57]. François de larrard structures granulaires et formulation des bétons – bétonlabpro ,1999
- [58]. Thierry Mambert , projet national de calibre – fabrication de béton mbe, formulation et suivi rhéologique des bétons – la méthode mbe , 2023
- [59]. Lanos c., Estellé p., Vers une réelle rhéométrie adaptée aux bétons frais, European journal of environmental and civil engineering, 2009.
- [60]. KC History missouri valley special collections, westporthigh school,1922.
- [61]. Nicolas Janberg, structure version 7.0 ,1998-2025.
- [62]. Latermix Cem Maxi ,béton caverneux ultra léger pour fortes épaisseurs
- [63]. Batiweb - Produit Aérolithys
- [64]. Article Batiproduits Misapor
- [65]. Archi contemporaine,antoine,jardin,2024
- [66].Engineering and Scientific Laboratory Instruments , Testeur de béton à ultrasons Pundit lab ,35-2302/09