



République algérienne démocratique et populaire



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil et travaux publics

Mémoire pour l'Obtention du diplôme de Master

Filière : GENIE CIVIL

Spécialité : structure

Thème

Formulation d'un béton à base des fibres hybrides

Présenté Par :

✚ Kerzazi Mohamed

✚ Guennaoui Mohamed Abdellah

Devant le jury composé de :

Mr. HOUARI A

UBBAT (AIN Témouchent) Examineur

Mme. BENDOUINA A

UBBAT (AIN Témouchent) Présidente

Mme DERBAL. A

UBBAT (AIN Témouchent) Encadreur

Année Universitaire 2024 – 2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Ce mémoire marque l'aboutissement d'un parcours riche en apprentissages, en efforts partagés et en rencontres marquantes. Nous souhaitons exprimer notre profonde reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à cette belle aventure.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à notre encadrante [Mme DERBAL. A], pour son accompagnement bienveillant, sa disponibilité et ses conseils précieux. Son regard critique et ses encouragements ont joué un rôle essentiel dans l'élaboration de ce travail.

Nos remerciements s'adressent également à toute l'équipe de l'laboratoire, pour son accueil chaleureux, la richesse des échanges et les opportunités d'apprentissage qu'elle nous a offertes tout au long de notre stage.

Nous tenons aussi à remercier nos enseignants pour leur dévouement, la qualité de leur enseignement et l'inspiration qu'ils nous ont apportée au fil de notre formation.

À nos familles et à nos proches, un immense merci pour leur soutien indéfectible, leur patience et leur confiance, qui nous ont portés dans les moments de doute comme dans ceux de réussite.

Enfin, nous souhaitons souligner le travail d'équipe qui a guidé cette réalisation : ce mémoire est le fruit d'une véritable collaboration, faite d'écoute, de respect, de persévérance et de complicité. Ce fut un plaisir de cheminer ensemble vers un objectif commun, et nous en garderons un souvenir précieux.

dedicace

À mes parents,

Pour votre amour inconditionnel, votre patience et votre soutien sans
.faill

Votre confiance m'apporté dans les moments de doute, et vos
.encouragements m'ont donné la force d'avancer

Merci pour vos sacrifices silencieux, vos conseils pleins de sagesse et
.votre présence rassurante

À mes amis,

Merci pour votre écoute, vos mots réconfortants, vos sourires partagés
.et votre soutien discret mais essentiel

Vous avez été une bouffée d'air dans les instants les plus intenses. Ce
mémoire vous est aussi dédié

Guennaoui Mohamed Abdellah

dedicace

À mes parents,

Vous êtes la source de ma motivation et de ma résilience.

Merci pour votre amour, vos prières et vos encouragements constants.

Chaque étape franchie est à votre image : bâtie sur la patience, l'effort et la bienveillance.

À mes amis,

Pour votre présence fidèle, vos encouragements, vos rires partagés et votre compréhension.

Dans les moments d'épuisement comme dans ceux de réussite, vous avez su trouver les gestes et les mots qui apaisent. Ce travail porte aussi la trace de votre amitié.

Kerzazi Mohamed

ملخص

يتناول هذا البحث دراسة الخرسانة المسلحة بالألياف الهجينة، والتي تمثل ابتكاراً هاماً في مجال مواد البناء. من خلال منهج نظري وتجريبي، تم تقييم تأثير الجمع بين الألياف المعدنية والألياف الاصطناعية على الخواص الميكانيكية والمتانة والبنية المجهرية للخرسانة. أظهرت النتائج أن استخدام الألياف الهجينة يحسن بشكل ملحوظ مقاومة الشد، اللبونة، التحكم في التشققات، وزيادة متانة المادة. تفتح هذه الدراسة آفاقاً جديدة لتحسين تركيبات الخرسانة المخصصة للتطبيقات الإنشائية المتطلبة.

خطوات العمل الرئيسية:

مراجعة شاملة للأدبيات حول أنواع الألياف المختلفة (معدنية، بولي بروبيلين، طبيعية)، خصائصها الميكانيكية وآلية تقويتها.

توصيف المواد المستخدمة (الأسمنت، الركام، الألياف) وتحديد نسب الجرعات المثلى.

إعداد خلطات خرسانية بألياف هجينة مع نسب وتركيبات مختلفة من الألياف.

إجراء اختبارات تجريبية ميكانيكية (ضغط، شد، انحناء)، تقييم المتانة، ودراسة البنية المجهرية.

تحليل وتفسير النتائج لفهم تفاعل الألياف مع المصفوفة وتحسين تركيبات الخرسانة

الكلمات المفتاحية:

الألياف الهجينة، الألياف المعدنية، ألياف البولي بروبيلين، الألياف الزجاجية، الخبث.

Abstract

This work focuses on the study of hybrid fiber-reinforced concrete, a major innovation in construction materials. Through theoretical, experimental, the impact of combining metallic and synthetic fibers on the mechanical properties, durability, and microstructure of concrete was evaluated. The results demonstrate that fiber hybridization significantly enhances tensile strength, ductility, crack control, and material durability. This research opens new perspectives for optimizing concrete formulations for demanding structural applications.

Comprehensive literature review on different fiber types (metallic, polypropylene, natural), their mechanical properties, and reinforcement mechanisms was adding, characterization of materials used (cement, aggregates, fibers) and determination of optimal fiber dosages, preparation of hybrid fiber concrete mixes with various fiber combinations and dosages. xperimental testing including mechanical tests (compression, tensile, flexural), durability assessments, and microstructural analysis.

Analysis and interpretation of results to understand fiber-matrix interactions and optimize concrete formulations.

Keywords:

Hybrid fibers; metallic fibers; polypropylene fibers, glass fiber, slag.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude du béton à fibres hybrides, une innovation majeure dans le domaine des matériaux de construction. À travers une approche théorique, expérimentale, l'impact de la combinaison de fibres métalliques et synthétiques sur les propriétés mécaniques, la durabilité et la microstructure du béton a été évalué. Les résultats montrent que l'hybridation des fibres améliore significativement la résistance à la traction, la ductilité, la maîtrise de la fissuration ainsi que la durabilité du matériau. Cette recherche ouvre de nouvelles perspectives pour l'optimisation des bétons destinés à des applications structurelles exigeantes.

Recherche bibliographique approfondie sur les différents types de fibres (métalliques, polypropylène, naturelles), leurs caractéristiques mécaniques et leurs mécanismes de renforcement.

Caractérisation des matériaux utilisés (ciment, granulats, fibres) et définition des dosages optimaux.

Formulation de plusieurs mélanges de béton à fibres hybrides avec divers dosages et combinaisons de fibres.

Réalisation d'essais expérimentaux mécaniques (compression, traction, flexion), d'évaluation de la durabilité et d'analyse microstructurale.

Analyse et discussion des résultats pour comprendre les interactions entre fibres et matrice cimentaire et proposer des formulations optimisées.

Mots clés :

Fibres hybrides ; fibres métalliques ; fibres polypropylène, fibre de verre, laitier.

Sommaire

<i>Introduction générale</i> :	7
Chapitre 1 RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES	
1. Introduction	8
2. Historique du Béton à Base de Fibres Hybrides	8
A. Les Origines (Antiquité à 1910)	8
B. Développement Précoce (1911-1940)	8
C. Avancées Technologiques (1960-1980)	8
D. Émergence des Fibres Hybrides (1980-Présent)	9
3. Compositions et Formulations du Béton à Base de Fibres Hybrides	9
A. Composants du Mélange	9
B. Dosage des Fibres	10
C. Effets sur les Propriétés Mécaniques	10
4. Le Béton de Fibres Hybrides : « Types et Formes Géométriques »	10
A. Types de Fibres	10
1. Fibres Métalliques :	10
2. Fibres Synthétiques :	11
3. Fibres naturelle :	11
B. Formes Géométriques des Fibres	12
5. Rôles des Fibres Hybrides dans le Béton	12
a) Maîtrise de la Fissuration	13
b) Amélioration de la Résistance Mécanique	13
c) Ductilité et Comportement Post-Fissuration	13
d) Résistance aux Chocs et à l'Usure	13
e) Limitation du Retrait Plastique	13
f) Amélioration de la Durabilité	14

6. Conclusion	14
Chapiter 2 CARACTERISATION DES MATERIAUX	
1) Introduction	16
2) Caractérisation des matériaux	16
3) L'analyse granulométrique du sable	16
A. Module de finesse.....	21
4) La masse volumique absolue	21
I. Définition :.....	21
II. Matériel nécessaire	21
III. Mode opératoire.....	22
IV. Calcul de la masse volumique absolue (ρ_s):	22
5) La masse volumique apparente.....	23
I. Mode opératoire	23
7. Répétition de l'essai :.....	25
6) Equivalent de sable :	25
But de l'essai :	26
Principe de l'essai L'essai :	26
7) Ciment :.....	26
Caractéristiques chimiques :.....	27
Caractéristiques physiques :	27
Caractéristiques mécaniques :	27
Mesure de la masse volumique apparente de ciment [27].....	27
Mesure de la masse volumique absolue de ciment [27]	27
Mesure de la consistance de la pâte du ciment.....	28
La surface spécifique de Blaine du ciment :	29
Principe :.....	29
Matériel utilisé :	29
8) Laitier de hauts fourneaux :	32

A) Origine et formation des laitiers de haut fourneau :	32
B) Composition chimique :	32
C) Caractéristiques minéralogiques et physiques :	32
D) Applications et formes physiques :	32
9) Eau potable :	33
10) Les fibres :	33
A. Fibres Métalliques :	33
Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées :	34
B. Fibres de polypropylène :	34
Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées :	35
C. Fibres de verre :	35
Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées :	35
11) Les adjuvants :	36
Les caractéristiques physiques et chimiques : [38]	36
12) Conclusion :	36

Chapiter 3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

1 Introduction	39
2 Les essais de maniabilité :	39
Principe de l'essai :	39
L'appareil utilisé :	39
Conduite de l'essai :	40
3 Aéromètre à mortier :	41
4 Formulation du mortier témoin :	41
5 Formulation des mortiers :	42
6 Composition des mortiers utilisés :	42
7 Préparation et forme de l'échantillon :	42

1. Introduction des Constituants :	43
Ordre d'Introduction :	43
Ajout des Fibres :	43
2. Malaxage :	43
8 Les essais mécaniques sur les éprouvettes :	44
a) Résistance à la flexion [41] :	44
Commentaires :	48
b) Résistance à la compression :	49
Commentaires :	52
9 Les essais sur mortier à l'état durci :	53
Ultra son :	53
But :	53
Principe :	53
Mode opératoire :	53
Essai d'absorption d'eau :	58
But :	58
Principe :	58
Mode opératoire :	58
Essai Conductivité thermique:	65
But :	65
Principe :	65
Description de l'appareil :	66
Mode opératoire :	66
10 Conclusion :	74
Conclusion générale	76
Les Références :	77

Listes des figures

Chapitre 1 RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

Fig.I 1: fibres métallique [14].....	11
Fig.I 2: fibres de polypropylène [15].....	11
Fig.I 3: fibres de lin [16].....	12

Chapiter 2 CARACTERISATION DES MATERIAUX

Fig.II- 1: Essai d'analyse granulométrique	16
Fig.II- 2: Courbe granulométrique (sable gros 0 /3)	17
Fig.II- 3: Courbe granulométrique (sable fin 0 /2).....	19
Fig.II- 4: Module finesse du 3ème échantillon (79,1 % du Sable gros (0/3) + 20,9 % du sable fin (0/2))	20
Fig.II- 5: Essai de la masse volumique absolu	22
Fig.II- 6: Essai de la masse volumique apparente	25
Fig.II- 7 : Equivalent de sable	25
Fig.II- 8: Packaging du ciment [26]	26
Fig.II- 9:Toluene.....	28
Fig.II- 10: Pycnomètre utilisé pour la	28
Fig.II- 11: Dispositif expérimental du perméabilimètre de Blaine[30]	30
Fig.II- 12:l'appareille de Blaine	31
Fig.II- 13: la quantité du ciment.	31
Fig.II- 14: Laitier de haut fourneau.	33
Fig.II- 15: La géométrie de fibres métalliques utilisées.....	34
Fig.II- 16: La géométrie de fibres polypropylène utilisées	34
Fig.II- 17: La géométrie de fibres verre utilisées	35
Fig.II- 18: L'adjuvant utilisé	36

Chapitre 3 RESULATATS ET DISCUSSIONS

Fig.III- 1 : Principe de fonctionnement du Maniabilimètre LCL(B)[40]	39
Fig.III- 2 : Appareil Maniabilimètre.....	40
Fig.III- 3: Appareil Aéromètre à mortier.....	41

Fig.III- 4: Moule prismatique 4×4×16	43
Fig.III- 5: Malaxeur	43
Fig.III- 6 : Préparations des éprouvettes des mortiers.....	44
Fig.III- 7: Conservation des éprouvettes	44
Fig.III- 8: Essai de flexion trois point	44
Fig.III- 9: schéma de l'essai de flexion de l'éprouvette 4*4*16.....	45
Fig.III- 10: variation de la résistance à la flexion en fonction du temps (témoin).....	46
Fig.III- 11: variation de la résistance à la flexion en fonction du temps (formulation 1).....	46
Fig.III- 12: variation de la résistance à la flexion en fonction du temps (formulation 2).....	47
Fig.III- 13: variation de la résistance à la flexion en fonction du temps (formulation 3).....	47
Fig.III- 14: variation de la résistance à la flexion en fonction du temps (formulation 4).....	Erreur ! Signet non défini.
Fig.III- 15: schéma de l'essai de flexion de l'éprouvette 4*4*16.....	49
Fig.III- 16: Essai de compression.....	49
Fig.III- 17: variation de la résistance à la compression en fonction du temps (témoin)	50
Fig.III- 18:variation de la résistance à la compression en fonction du temps(formulation1)	51
Fig.III- 19:variation de la résistance à la compression en fonction du temps(formulation2)	51
Fig.III- 20:variation de la résistance à la compression en fonction du temps(formulation3.....	Erreur ! Signet non défini.
Fig.III- 21:variation de la résistance à la compression en fonction du temps(formulation4)	52
Fig.III- 22: Appareil de l'ULTRASON.....	54
Fig.III- 23: La vitesse de propagation (témoin)	55
Fig.III- 24 : La vitesse de propagation (formulation1)	56
Fig.III- 25: La vitesse de propagation (formulation2)	56
Fig.III- 26: La vitesse de propagation(formulation3)	56
Fig.III- 27: La vitesse de propagation (formulation4)	57
Fig.III- 28:Essai d'absorption par capillarité	59

Fig.III- 29: Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps (7J).	60
Fig.III- 30: Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps (28J).	61
Fig.III- 31: Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps (60J).	63
Fig.III- 32: Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps (90J).	65
Fig.III- 33: Appareil de conductivité thermique	66
Fig.III- 34: Conductivité thermique des mortiers en fonction de temps (Témoin).	68
Fig.III- 35: Conductivité thermique des mortiers en fonction de temps (formulation1).....	68
Fig.III- 36: Conductivité thermique des mortiers en fonction de temps (formulation2).....	69
Fig.III- 37: Conductivité thermique des mortiers en fonction de temps (formulation3).....	69
Fig.III- 38: Conductivité thermique des mortiers en fonction de temps (formulation4).....	69
Fig.III- 39: Résistivité des mortiers en fonction de temps (témoin) ...	71
Fig.III- 40: Résistivité des mortiers en fonction de temps (témoin) ...	71
Fig.III- 42 : Résistivité des mortiers en fonction de temps (formulation2).....	72
Fig.III- 41 : Résistivité des mortiers en fonction de temps (formulation3).....	72
Fig.III- 43: Résistivité des mortiers en fonction de temps (formulation4).....	72

Liste des tableaux

Chapitre 2 CARACTERISATION DES MATERIAUX

Tableau. II- 1: Module finesse du 1er échantillon (sable gros 0/3)	17
Tableau. II- 2 : Module finesse du 2ème échantillon (sable fin 0/2) ..	18
Tableau. II- 3: Module finesse du 3ème échantillon (79,1 % du Sable gros (0/3) + 20,9 % du sable fin (0/2))	20
Tableau. II- 4: Module de finesse de différents échantillons	21
Tableau. II- 5: les résultats des masses volumiques réelles	23
Tableau. II- 6: les équations des masses volumiques réelles	23
Tableau. II- 7: Résultat de la Masse volumique apparente	25
Tableau. II- 8: compositions du ciment[25]	26
Tableau. II- 9: L'analyse chimique du ciment	27
Tableau. II- 10: Caractéristiques physiques de ciment utilisé	27
Tableau. II- 11: Caractéristiques Mécanique de ciment utilisé.....	27
Tableau. II- 12: Caractéristique physiques et mécaniques du ciment utilisé.....	29
Tableau. II- 13: Résultats d'analyse chimique de l'eau[33]	33
Tableau. II- 14: Caractéristiques Mécanique de fibre utilisée	34
Tableau. II- 15: Caractéristiques Mécanique de fibre utilisée	35
Tableau. II- 16: Caractéristiques Mécanique de fibre utilisée	35

Chapitre 3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau. III- 1: Classe de consistance selon la durée d'écoulement [40].....	40
Tableau. III- 2: Résultats de maniabilité	40
Tableau. III- 3 : Résultats d'Aéromètre à mortier.....	41
Tableau. III- 4: compositions du mortier utilisé.....	42
Tableau. III- 5: Malaxage du mortiers.....	43
Tableau. III- 6: valeurs de Résistance à la flexion	45
Tableau. III- 7 : valeurs de Résistance à la compression	50
Tableau. III- 8: La vitesse de propagation.....	55

Tableau. III- 9: Essai d'absorption d'eau (7J).....	59
Tableau. III- 10: Coefficient d'absorption d'eau dans un temps diffèrent (7J)	59
Tableau. III- 11: Essai d'absorption d'eau (28J).....	60
Tableau. III- 12 : Coefficient d'absorption d'eau dans un temps diffèrent (28J)	61
Tableau. III- 13: Essai d'absorption d'eau (60J).....	62
Tableau. III- 14: Coefficient d'absorption d'eau dans un temps diffèrent (60J)	63
Tableau. III- 15: Coefficient d'absorption d'eau dans un temps diffèrent (90J)	64
Tableau. III- 16: Essai d'absorption d'eau (90J).....	64
Tableau. III- 17 : Les résultats de conductivité thermique (28J)	67
Tableau. III- 18: Les résultats de conductivité thermique (60J)	67
Tableau. III- 19: Les résultats de conductivité thermique (7J) Erreur ! Signet non défini.	
Tableau. III- 20: Les résultats de conductivité thermique (90J)	68

Introduction Générale

Introduction générale :

Les avancées significatives de la recherche en matériaux de construction, dans les décennies passées, ont conduit à l'introduction de nouveaux composants pour améliorer les propriétés durables et mécaniques du béton. Dans ce cadre, la matrice cimentaire fibrée a été proposée comme solution prometteuse pour améliorer la résistance, la ductilité et la durabilité du béton. En particulier, le béton fibré a montré des performances remarquables par rapport au béton ordinaire en termes de résistance aux fissures, résistance à l'impact, fatigue, ce qui le préconise pour des applications structurelles exigeantes.

Pourtant, malgré les indéniables avantages du béton fibré, l'utilisation de fibres uniques (métalliques, synthétiques, naturelles) reste limitée quant à l'optimisation des propriétés mécaniques et aux coûts d'exploitation du matériau. C'est ainsi que le concept de mélange de fibres dans le béton hybride a pris forme, l'hybridation de fibres étant de réunir dans la même matrice de béton deux ou plusieurs types de fibres complémentaires de manière à bénéficier d'avantages spécifiques de chaque type tout en compensant leurs défauts.

Le présent travail a pour but de vérifier l'opportunité de la formulation d'un béton à fibres hybrides, en évaluant l'impact du mélange de différents types de fibres sur ses caractéristiques mécaniques, sa durabilité et sa microstructure, de manière à mieux comprendre les mécanismes impliqués dans leur interfécondité, et à proposer de meilleures formulations pour des domaines d'application donnés.

Les études déjà réalisées dans ce domaine fournissent des éléments de réponse sur la possibilité d'améliorer les performances du béton en utilisant des fibres hybrides. La combinaison de fibres métalliques et de fibres synthétiques, démontre la possibilité d'une synergie où la fibre métallique améliore la résistance à la traction et à la flexion et à la fissuration [1], tandis que les fibres synthétiques améliorent la durabilité. Ou encore, peut apparaître la solution qui viendrait chercher des fibres fabriquées à partir de ressources naturelles, tel le coco ou le sisal en faveur d'applications écologiques et économiques, mais la compatibilité à la matrice cimentaire et la durabilité ne font pas encore consensus.

Introduction Générale

Notre projet de fin d'étude s'inscrit donc dans une démarche expérimentale qui vise à enrichir l'état de l'art concernant la formulation de bétons fibrés hybrides. Les résultats de cette recherche pourraient en effet faire émerger de nouvelles possibilités dans le secteur de la construction, notamment concernant les ouvrages en cours de construction de structures soumises à des conditions de chargement sévères ou dans des environnements agressifs.

Cette présente étude comprend trois principaux chapitres :

Le premier chapitre une recherche bibliographique qui traite principalement les différents types de sable, des fibres, leurs caractéristiques mécaniques et mécanisme du renforcement, ainsi que les propriétés mécaniques du béton de fibres.

Nous avons abordé dans le deuxième chapitre la caractérisation des matériaux utilisés et les procédures d'essai effectué sur les bétons préparés.

Le dernier chapitre présente les résultats et la discussion sur l'ensemble des résultats et obtenus consacré à l'analyse

CHAPITRE 1

RECHERCHES

BIBLIOGRAPHIQUES

1. Introduction

La formulation d'un béton à base de fibres hybrides représente une avancée significative dans le domaine des matériaux de construction. Ce type de béton, qui intègre à la fois des fibres métalliques et des fibres en polypropylène, vise à améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du matériau. Les recherches bibliographiques sur ce sujet mettent en lumière l'importance des fibres dans l'amélioration des caractéristiques du béton, notamment en ce qui concerne sa résistance à la traction et sa ductilité. [1][2]

2. Historique du Béton à Base de Fibres Hybrides

L'utilisation des fibres dans le béton remonte à plusieurs siècles, mais l'essor du béton à base de fibres hybrides a réellement commencé au XXe siècle. Cet historique se divise en plusieurs étapes clés qui ont marqué le développement et l'innovation dans ce domaine.

A. Les Origines (Antiquité à 1910)

- **Antiquité** : Des matériaux renforcés avec des fibres, comme les pailles dans la brique de boue, ont été utilisés par les Égyptiens. Des fibres d'amiante ont également été intégrées dans des poteries en argile en Finlande, il y a environ 5000 ans [3]
- **1910** : J. Porter réalise des essais montrant que l'ajout de fibres courtes dans le béton augmente sa résistance à la traction et à la compression. Cette année marque un tournant dans l'expérimentation des bétons fibrés.[4]

B. Développement Précoce (1911-1940)

- **1911** : Graham [5] dépose un brevet américain pour l'utilisation de tranches d'acier comme renforts fibreux.
- **1920-1940** : Plusieurs brevets sont établis, notamment par [6] qui recommandent l'incorporation de particules de fer et de fils d'acier pour améliorer la résistance du béton. Ces travaux ouvrent la voie à une utilisation plus systématique des fibres dans le béton.

C. Avancées Technologiques (1960-1980)

- **Années 1960** : Le développement des bétons fibrés prend un nouvel élan avec les recherches de [7] qui analysent les mécanismes de propagation des

fissures dans le béton renforcé. L'ajout de fibres d'acier devient courant, et les premiers essais significatifs montrent une amélioration notable des propriétés mécaniques.

- **1970** : L'incorporation de fibres d'acier dans le béton réfractaire est explorée, menant à des résultats prometteurs en termes de résistance et de durabilité.

D. Émergence des Fibres Hybrides (1980-Présent)

- **Années 1980** : Les bétons renforcés avec des fibres hybrides commencent à être étudiés. Ce concept repose sur l'idée que la combinaison de différents types de fibres peut offrir des avantages synergiques, améliorant ainsi les performances mécaniques du béton.[8]
- **Recherche actuelle** : Les études contemporaines se concentrent sur l'optimisation des mélanges de fibres métalliques et synthétiques, visant à maximiser la résistance aux fissures et la durabilité du béton. Les résultats montrent que l'utilisation de fibres hybrides peut réduire les fissures et améliorer la ductilité du matériau.

3. Compositions et Formulations du Béton à Base de Fibres Hybrides

La formulation d'un béton à base de fibres hybrides repose sur l'intégration de différents types de fibres pour optimiser les propriétés mécaniques et la durabilité du matériau.

A. Composants du Mélange

Pour formuler un béton à base de fibres hybrides, plusieurs composants doivent être pris en compte :

- **Ciment** : Le ciment Portland est généralement utilisé comme liant principal. Son choix peut influencer les propriétés mécaniques finales du béton.
- **Granulats** : Les granulats fins (sable) et grossiers (gravier) constituent la majeure partie du volume du béton. La taille et la distribution granulométrique affectent également la résistance et la durabilité.
- **Eau** : L'eau est essentielle pour l'hydratation du ciment. Le rapport eau/ciment doit être soigneusement contrôlé pour garantir une bonne résistance.
- **Adjuvants** : Des adjuvants peuvent être ajoutés pour améliorer certaines propriétés, comme la fluidité ou le temps de prise. Par exemple, des plastifiants ou des super plastifiants peuvent être utilisés pour réduire le rapport eau/ciment sans affecter la *maniabilité*.

B. Dosage des Fibres

Le dosage des fibres est un facteur clé dans la formulation du béton fibré :

- **Fibres Polypropylène** : Un dosage typique se situe entre 0,1% et 0,15% du poids total du béton. Ce dosage permet d'améliorer significativement les propriétés au jeune âge.
- **Fibres Métalliques** : En général, elles sont ajoutées à hauteur d'environ 0,5% à 1% du poids total. Ce dosage vise à maximiser l'effet renforçant tout en maintenant une bonne maniabilité. [9]

C. Effets sur les Propriétés Mécaniques

L'ajout de fibres hybrides modifie plusieurs propriétés mécaniques essentielles :

- **Résistance à la Compression** : Les bétons renforcés par des fibres montrent souvent une augmentation significative de leur résistance à la compression par rapport aux bétons non fibrés.
- **Résistance à la Flexion** : L'intégration de fibres hybrides améliore également la résistance à la flexion, ce qui est crucial pour les applications structurelles soumises à des charges variées.
- **Ductilité et Comportement Post-Fissuration** : Les fibres métalliques contribuent à une meilleure ductilité, permettant au béton de supporter des charges même après l'apparition de fissures. [10]

4. Le Béton de Fibres Hybrides : « Types et Formes Géométriques »

Le béton de fibres hybrides est un matériau composite qui intègre différents types de fibres pour améliorer ses propriétés mécaniques et sa durabilité.

A. Types de Fibres

Les fibres utilisées dans le béton hybride peuvent être classées en trois grandes catégories, chacune ayant des caractéristiques spécifiques :

1. Fibres Métalliques :

- **Caractéristiques** : Généralement en acier, ces fibres sont robustes et offrent une excellente résistance à la traction. Elles sont particulièrement efficaces pour contrôler les fissures dans le béton.

- **Applications** : Utilisées dans des structures soumises à des charges élevées, comme les dalles, les poutres et les éléments préfabriqués.[11]



Fig. I 1: fibres métallique [14]

2. Fibres Synthétiques :

- **Caractéristiques** : Comprenant des matériaux comme le polypropylène et le polyéthylène, ces fibres sont légères et résistantes à la corrosion. Elles aident à réduire le retrait plastique du béton.
- **Applications** : Souvent utilisées dans des applications telles que les dallages, les mortiers projetés et les produits préfabriqués.[12]



Fig. I 2: fibres de polypropylène [15]

3. Fibres naturelle :

- **Caractéristiques** : Les fibres naturelles, comme le chanvre, le lin et le sisal, sont biodégradables, légères et offrent une bonne résistance mécanique. Elles contribuent à améliorer la ductilité du béton et à réduire la fissuration, tout en étant respectueuses de l'environnement.

- **Applications** : Utilisées dans le béton fibré pour des dallages, des mortiers projetés et des éléments préfabriqués, ces fibres renforcent les structures en augmentant leur résistance aux impacts et à la fatigue. Elles permettent également de réaliser des constructions plus durables et écologiques, remplaçant progressivement les fibres synthétiques dans divers projets de génie civil. [13]



Fig. I 3: fibres de lin [16]

B. Formes Géométriques des Fibres

Les fibres peuvent également varier en termes de formes géométriques, ce qui influence leur performance dans le béton :

- **Fibres Lisses** : Ces fibres ont une surface uniforme qui facilite leur incorporation dans le mélange de béton. Elles sont souvent utilisées pour des applications générales où une bonne dispersion est requise.
- **Fibres Crantées ou Ondulées** : Ces formes augmentent l'adhérence entre la fibre et la matrice de béton, améliorant ainsi la résistance à la traction. Elles sont particulièrement efficaces pour contrôler les fissures.
- **Fibres à Crochet** : Ces fibres présentent des extrémités en forme de crochet qui permettent un meilleur ancrage dans le béton. Elles sont idéales pour des applications où une résistance accrue aux fissures est nécessaire.
- **Fibres Bi ondulées** : Ces fibres ont une forme spécifique qui favorise l'interaction avec la matrice de béton, offrant ainsi une meilleure performance mécanique.

5. Rôles des Fibres Hybrides dans le Béton

Les fibres hybrides, qui combinent différents types de fibres dans un mélange de béton, jouent un rôle essentiel dans l'amélioration des propriétés mécaniques et fonctionnelles du matériau. Voici un aperçu des principaux rôles que ces fibres exercent dans le béton.

a) Maîtrise de la Fissuration

Les fibres hybrides sont principalement utilisées pour contrôler la fissuration du béton. Elles aident à limiter la propagation des microfissures en répartissant les contraintes à travers le matériau, ce qui réduit le risque de fissures plus larges et plus graves. En cas de formation de fissures, les fibres permettent de transmettre les efforts, agissant comme des ponts qui maintiennent l'intégrité structurelle.

b) Amélioration de la Résistance Mécanique

L'incorporation de fibres hybrides améliore plusieurs aspects de la résistance mécanique du béton :

- Résistance à la Traction : Les fibres métalliques augmentent la résistance à la traction, permettant au béton de mieux supporter les forces qui tendent à l'étirer
- Résistance à la Flexion : Les bétons renforcés par des fibres montrent une meilleure performance en flexion, ce qui est crucial pour les éléments structuraux soumis à des charges variables.[17]

c) Ductilité et Comportement Post-Fissuration

Les fibres hybrides confèrent au béton une ductilité accrue, ce qui signifie que le matériau peut se déformer sans se rompre immédiatement. Cela est particulièrement important pour les structures soumises à des charges dynamiques ou sismiques. Après l'apparition de fissures, les fibres continuent d'apporter un soutien en maintenant une certaine capacité portante.

d) Résistance aux Chocs et à l'Usure

Les fibres hybrides augmentent également la résistance aux chocs et à l'usure du béton. Cela est particulièrement bénéfique dans les applications où le béton est exposé à des impacts ou à des conditions abrasives, comme dans les sols industriels ou les structures extérieures.

e) Limitation du Retrait Plastique

L'ajout de fibres hybrides aide à réduire le retrait plastique, un phénomène courant qui peut entraîner des fissures superficielles dans le béton frais. En améliorant la cohésion du mélange, les fibres contribuent à maintenir l'intégrité du béton pendant sa phase de durcissement.

f) Amélioration de la Durabilité

Les bétons renforcés par des fibres hybrides présentent une meilleure durabilité face aux agents agressifs tels que l'eau, les sels et les produits chimiques. Cela contribue à prolonger la durée de vie des structures en béton et réduit les coûts d'entretien.[18]

6. Conclusion

Le béton à base de fibres hybrides constitue une avancée majeure dans les matériaux de construction, alliant différents types de fibres pour améliorer ses propriétés mécaniques et sa durabilité. Ces fibres, qu'elles soient métalliques, synthétiques ou minérales, jouent des rôles essentiels, notamment dans la maîtrise des fissures, l'augmentation de la résistance à la traction et à la flexion, ainsi que l'amélioration de la ductilité. En outre, elles renforcent la résistance aux chocs et à l'usure, limitent le retrait plastique et augmentent la durabilité face aux agents agressifs. Ce matériau innovant ouvre la voie à des applications variées dans le secteur de la construction. Les recherches futures devraient continuer à explorer les interactions entre différents types de fibres pour concevoir des bétons encore plus performants. En somme, le béton fibré hybride répond aux défis contemporains en matière de durabilité et de performance, contribuant ainsi à un avenir plus durable pour l'industrie de la construction.[19]

CHAPITRE 2

CARACTERISATION

DES MATERIAUX

1) Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les caractéristiques des différents constituants utilisés dans la formulation et la fabrication du béton à base de fibres hybrides. Les résistances mécaniques des bétons en générale et des mortiers à base de fibres hybrides nécessitent des précautions particulières à savoir : le choix et la sélection des constituants ainsi que leurs utilisations pour pouvoir obtenir les résultats recherchés en matière de résistance.

Les composants de base d'un mortier à base de fibres hybrides sont l'eau, le ciment et les sables plus les fibres (métalliques ; naturelle ; synthétiques) qui peuvent être rajoutés dans le but de modifier les propriétés telles que la résistance, ces matériaux répondant à des avis techniques pour une utilisation dans le mortier par l'application de quelques essais tels que : 'équivalent de sable ; masse volumique (apparent / absolu) ; analyse granulométrie'.

2) Caractérisation des matériaux

Dans cette étude nous avons utilisé deux type de sables, un sable fin (0/2) de la carrière de Terga, et un sable gros (0/3) de provenant de la plage des mouches (Wilaya d'Ain Témouchent).

3) L'analyse granulométrique du sable

L'analyse granulométrique du sable est une méthode essentielle pour déterminer la distribution des tailles des grains dans un échantillon de sable. Ce processus permet d'évaluer les caractéristiques physiques du sable, qui sont cruciales pour diverses applications dans le domaine de la construction et de l'ingénierie.[20]



Fig.II- 1: Essai d'analyse granulométrique

Chapitre 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX

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

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

Module de finesse du sable : Mf= 2,88

Tableau. II- 1: Module finesse du 1er échantillon (sable gros 0/3)

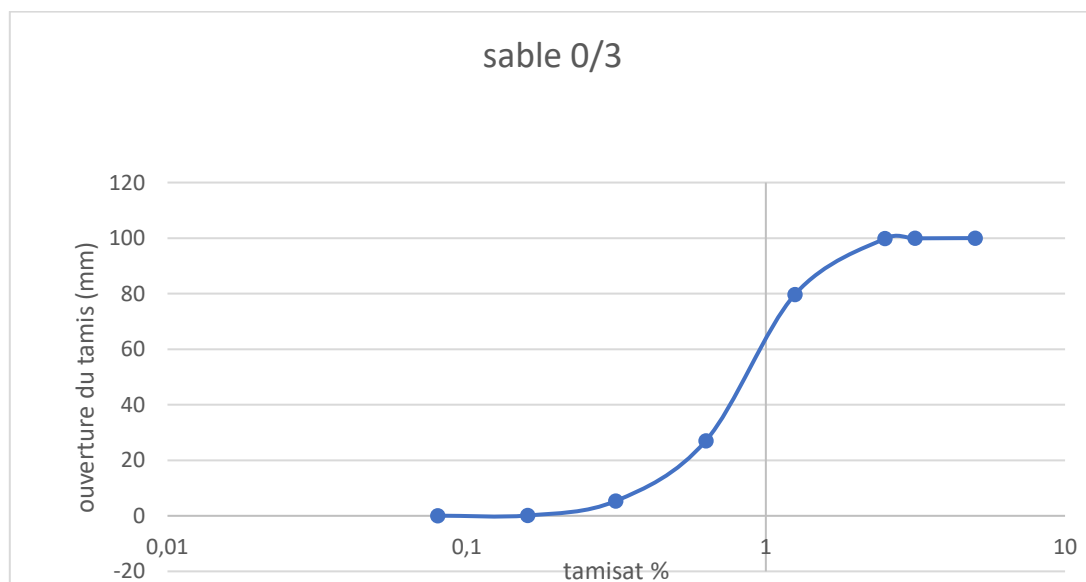


Fig.II- 2: Courbe granulométrique (sable gros 0 /3)

Chapitre 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX

A partir de l'analyse granulométrique (figure II-1) et on calculant le module de finesse qui a une valeur de 2.88(voir tableau II-1) on a constaté que ce sable est un sable grossier et nécessite une correction avec un sable fin d'où l'utilisation de notre sable 02 qui a un module de finesse de 1,06 (voir tableau II-2).

Les différentes étapes pour la correction du sable 01 en utilisant le sable 02 est démontré dans l'étape suivante.

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

Analyse granulométrique par tamisage NF P18-560				
Masse de l'échantillon (M1) =1000g				
Ouverture du tamis (mm)	Refus partiels Ri (g)	Refus cumulés Rn (g)	%R.c RC=100*Rn%M1	% du tamisat.c TC=100-RC
5	0	0	0	100
3,15	0,05	0,05	0,005	99,995
2,5	0,07	0,12	0,012	99,988
1,25	8,46	8,58	0,858	99,142
0,63	28	36,58	3,658	96,342
0,315	206,95	243,53	24,353	75,647
0,16	535,13	778,66	77,866	22,134
0,08	118,8	897,46	89,746	10,254
Fond	100,5	997,97	99,796	0,204
Module de finesse du sable : Mf= 1,06				

Tableau. II- 2 : Module finesse du 2ème échantillon (sable fin 0/2)

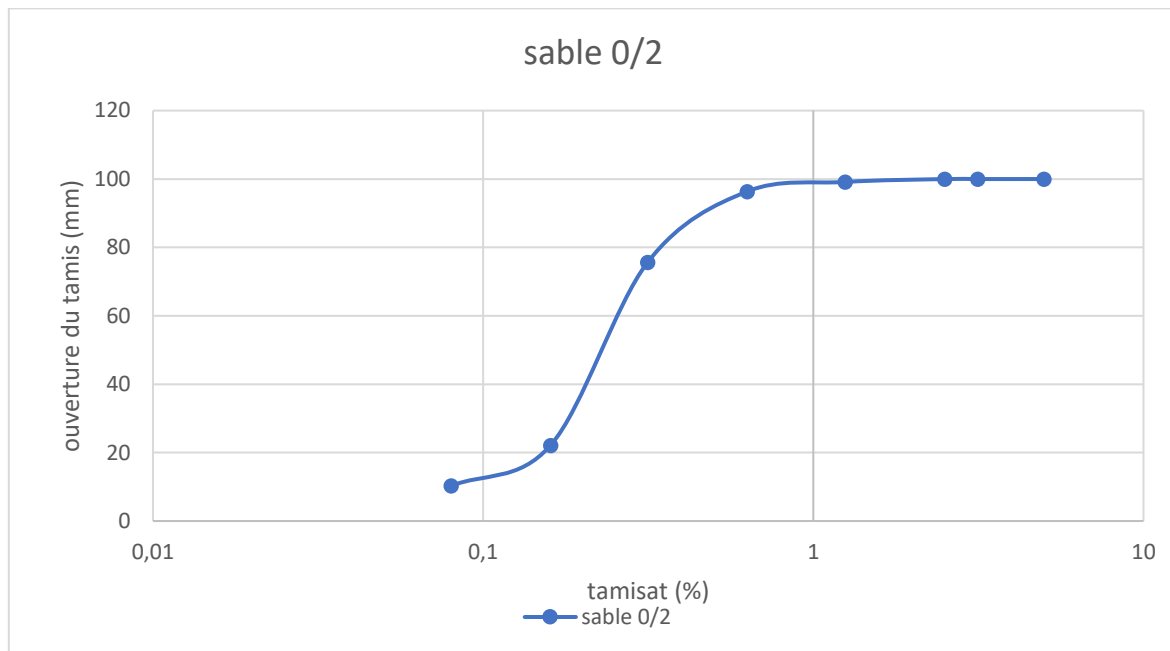


Fig.II- 3: Courbe granulométrique (sable fin 0 /2)

La courbe granulométrique du sable 0/2 indique une distribution granulométrique relativement étroite, avec une majorité des grains de sable ayant une taille comprise entre 0,1 mm et 1 mm.

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

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

$$G1 = \frac{MF - MF2}{MF1 - MF2} = \frac{2,5 - 1,06}{2,88 - 1,06} = 79,1\%$$

$$G2 = \frac{MF1 - MF}{MF1 - MF2} = \frac{2,88 - 2,5}{2,88 - 1,06} = 20,9\%$$

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

- **3ème échantillon 79,1 % du Sable gros (0/3) + 20,9 % du sable fin (0/2) :**

Chapitre 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX

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

Module de finesse du sable : $M_f = 2,509$

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

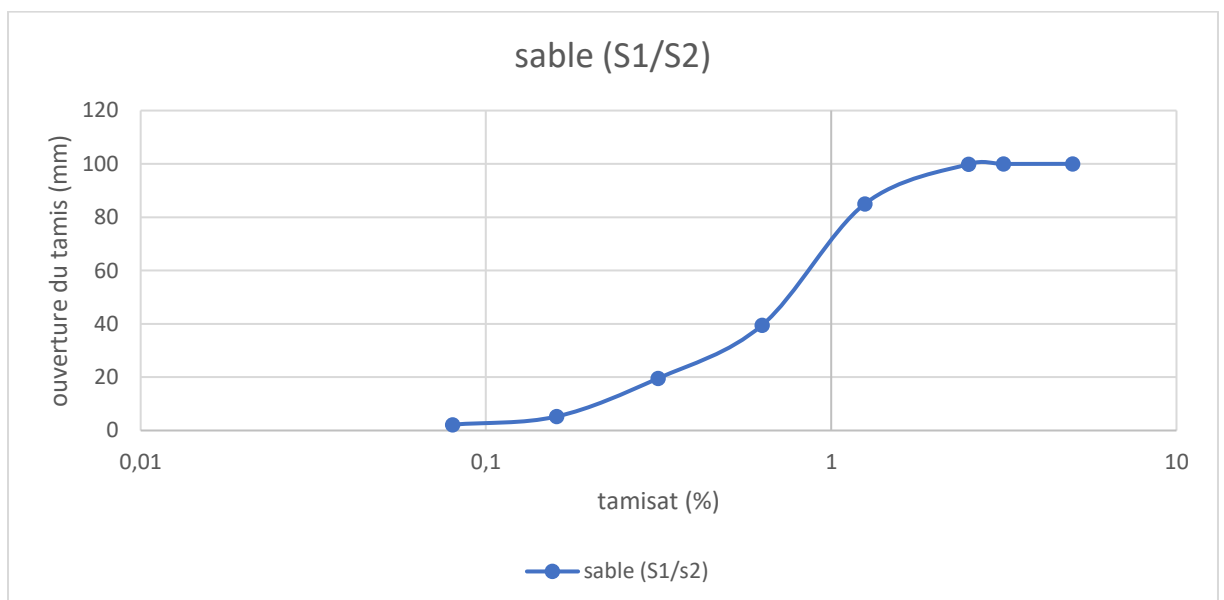


Fig.II- 4: Module finesse du 3ème échantillon (79,1 % du Sable gros (0/3) + 20,9 % du sable fin (0/2))

La courbe granulométrique du sable (S1/S2) est similaire à celle du sable 0/3, mais avec une distribution granulométrique encore plus large. Cela indique que le sable est encore moins bien gradué et donc moins stable et moins résistant au tassement.

A. Module de finesse

La finesse d'un sable est estimée conventionnellement par une grandeur appelée module de Finesse. Ce dernier est égal au 1/100ème de la somme des refus, exprimés en pourcentage des différents tamis de la série suivante : (0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5mm). $MF = \frac{\sum RC}{10 RC}$: refus cumulé en (%).

La valeur du module de finesse nous renseigne sur la situation du sable utilisé vis-à-vis le fuseau de référence, lorsque MF est compris entre :

- 1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins, c'est le fuseau B ;
- 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel, c'est le fuseau A ;
- 2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier, c'est le fuseau C, Il donnera des bétons résistants mais moins maniables. [20] Les modules de finesse de chaque échantillon après les calculs sont représentés dans le tableau ci-dessus :

Echantillons	Module de finesse	Classement des sables
sable gros (0/3)	2,88	Sable un peu grossier
sable fin (0/2)	1,06	Sable trop fin
sable gros (0/3) + sable fin (0/2)	2,509	Sable préférentiel

Tableau. II- 4: Module de finesse de différents échantillons

4) La masse volumique absolue

I. Définition :

La méthode utilisant un pycnomètre est une technique courante et précise pour mesurer la masse volumique absolue des granulats comme le sable. Voici le protocole général basé sur les normes et travaux pratiques universitaires :[21]

II. Matériel nécessaire

- Pycnomètre en verre (généralement de 100 cm³)
- Balance de précision

- Eau distillée
- Échantillon de sable sec (préalablement séché à l'étuve à 105°C)
- Entonnoir, tige en verre pour agitation

III. Mode opératoire

1. **Pesée du pycnomètre vide (M0)** : Peser le pycnomètre propre et sec.
2. **Ajout du sable (M1)** : Introduire une masse connue de sable sec (environ 30 g) dans le pycnomètre, puis peser l'ensemble.
3. **Remplissage partiel avec de l'eau** : Remplir le pycnomètre à moitié avec de l'eau distillée, puis agiter vigoureusement pour éliminer les bulles d'air emprisonnées entre les grains.
4. **Remplissage complet** : Compléter le remplissage du pycnomètre avec de l'eau jusqu'au niveau de remplissage (repère sur le pycnomètre) en utilisant une pissette.
5. **Agitation et repos** : Secouer doucement le pycnomètre bouché pour homogénéiser, puis laisser reposer pour stabiliser le volume.
6. **Pesée du pycnomètre rempli (M2)** : Sécher les parois extérieures et peser le pycnomètre rempli de sable et d'eau.
7. **Pesée du pycnomètre rempli d'eau seule (M3)** : Vider le pycnomètre, le laver, le remplir uniquement avec de l'eau jusqu'au même niveau, sécher et peser.

IV. Calcul de la masse volumique absolue (ρ_s):



Fig.II- 5: Essai de la masse volumique absolu

Où :

- M1 : est la masse des granulats saturés et superficiellement secs dans l'air en grammes ;
- M2 : est la masse du pycnomètre contenant l'échantillon de granulats saturés, en grammes ;
- M3 : est la masse du pycnomètre rempli d'eau uniquement, en grammes ;
- M4 : est la masse de la prise d'essai séchée à l'étuve dans l'air, en grammes.

Les masses volumiques réelles	Les équations
La masse volumique absolue	$\rho_a = \frac{M4}{M4 - (M2 - M3)}$
La masse volumique réelles déterminer par sèche d'étuve	$\rho_{rd} = \frac{M4}{M1 - (M2 - M3)}$
La masse volumique saturée à surface sèche	$\rho_{ssd} = \frac{M1}{M1 - (M2 - M3)}$

Tableau. II- 5: les résultats des masses volumiques réelles

	Sable gros :	Sable fin :
La masse volumique absolue	4.083	1.342
La masse volumique réelle déterminée par sèche d'étuve	2.18	1.203
La masse volumique saturée à surface sèche	2.646	1.306

Tableau. II- 6: les équations des masses volumiques réelles

5) La masse volumique apparente

Cet essai est régi par la norme [22], elle est définie comme étant la masse de l'unité de volume apparente du corps, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient [22].

I. Mode opératoire

Matériel nécessaire

- Récipient de volume connu (1 L recommandé)
- Balance électronique
- Tamis (pour le sable, généralement de 4 mm)
- Entonnoir
- Règle à araser
- Etuvent à 105 °C pour le séchage

Étapes de l'essai

1. Préparation de l'échantillon :

- Tamisez le sable à travers un tamis de 4 mm pour éliminer les particules plus grosses.

2. Pesée du récipient vide :

- Pesez le récipient vide et notez sa masse ($M_1=1400\text{g}$).

3. Remplissage du récipient :

- Remplissez le récipient avec le sable à l'aide d'un entonnoir, en laissant tomber le sable d'une hauteur d'environ 15 cm pour éviter le tassement.
- Utilisez une règle à araser pour égaliser la surface du sable au niveau du bord du récipient.

4. Pesée du récipient rempli :

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

5. Calcul de la masse du sable :

- Calculez la masse du sable en soustrayant la masse du récipient vide : $M=M_2-M_1$.

6. Calcul de la masse volumique apparente :

- La masse volumique apparente (ρ_{ap}) est calculée en utilisant la formule $\rho = \frac{M}{V}$

V est le volume du récipient (en m^3) ; $V=1000$ ml.

7. Répétition de l'essai :



Fig.II- 6: Essai de la masse volumique apparente

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

Les essais	Composition de sable	La masse volumique ρ_A
1 ^{er} essai	Sable gros	1,647 g
2 ^{ème} essai	sable fin	1,339g

Tableau. II- 7: Résultat de la Masse volumique apparente

6) Equivalent de sable :

Il est défini par la norme [23] ; cet essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent [24].

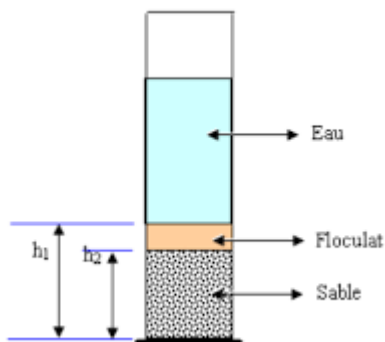


Fig.II- 7 : Equivalent de sable

A) But de l'essai :

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les floccules fins contenues dans le sable. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

B) Principe de l'essai L'essai :

Est effectué sur la fraction 0/2 mm du sable à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

- Hauteur H1 : sable propre + éléments fins. Hauteur H2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention dit équivalent de sable permettant de déterminer le degré de propreté du sable : $S = \frac{H_1}{H_2} \times 100$ Selon que la hauteur H2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine ESV (équivalent de sable visuel) ou ESP (équivalent de sable au piston).

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

$$ES = \frac{4}{5.3} \times 100 \rightarrow ES = 75.47\%$$

Remarque : pour le sable gros (0/3) leur degré de pureté est 100%.

7) Ciment :

Le ciment utilisé est un ciment CEM II A-P 42.5 N [GICA BETON].



Fig.II- 8: Packaging du ciment [26]

COMPOSITIONS	valeur
Clinker	80 à 94%
Ajoute calcaire (Catégorie A)	6 à 20%
Constituant secondaire	0 à 5%

Tableau. II- 8: compositions du ciment[25]

❖ Caractéristiques chimiques :

L'analyse chimique du ciment utilisé a révélé l'existence des éléments qui sont présentés en pourcentage massique dans le tableau suivant :

Caractéristiques chimiques :	Valeur :
Teneur en sulfates (SO ₃)	≤ 4.0 %
Teneur en chlorures (Cl)	≤ 0.10 %

Tableau. II- 9: L'analyse chimique du ciment

❖ Caractéristiques physiques :

Le tableau suivant résume certaines caractéristiques physiques de ciment utilisé :

Caractéristiques physiques :	Valeur :
Temps de prise	≥ 60 minutes
stabilité	≤ 10 minutes

Tableau. II- 10: Caractéristiques physiques de ciment utilisé

❖ Caractéristiques mécaniques :

Le tableau suivant résume certaines caractéristiques mécaniques de ciment utilisé :

Caractéristiques Mécaniques :	Valeur :
Résistance à la compression à 2 jours (42.5N)	≥ 10.0 N/mm ²
Résistance à la compression à 28 jours (42.5N)	≥ 42.5 N/mm ²

Tableau. II- 11: Caractéristiques Mécanique de ciment utilisé

❖ Mesure de la masse volumique apparente de ciment [27]

Nous avons mesuré la masse volumique apparente de ciment étudiés par la détermination de la masse d'un remplissage d'une mesure d'un litre, qui doit être effectué sans aucun tassement. Trois essais ont été effectués. La précision de la balance utilisée est de 0.1 gramme, les valeurs moyennes obtenues sont représentées sur le tableau II.8.

❖ Mesure de la masse volumique absolue de ciment [27]

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

- On pèse d'abord le pycnomètre vide et on le remplit par la suite de toluène jusqu'au trait repère, soit une masse (M1),
- On pèse une quantité du ciment, soit une masse (M2),
- On introduit la quantité M2 du ciment dans le Toluène après avoir vidé le pycnomètre à moitié,
- On élimine l'air et on remplit le pycnomètre de toluène au trait repère et on le pèse soit la masse (M3) Donc, la masse volumique absolue est égale à :

$$Mv(abs) = (M)/(V2 - V1)$$



Fig.II- 10: Pycnomètre
utilisé pour la

mesure de la masse volumique absolue



Fig.II- 9:Toluene

❖ Mesure de la consistance de la pâte du ciment

L'essai de consistance est effectué à l'aide de l'appareil de Vicat et d'une sonde conformément [28]. Cet essai consiste à déterminer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir la consistance désirée de la pâte du ciment. Le résultat obtenu de la consistance du ciment étudié est présenté ci-dessous dans le tableau II.8.

Temps de prise du ciment [28] À l'aide de l'appareil de Vicat et une aiguille, [28] on a pu déterminer le temps de prise du ciment utilisé et notamment son moment de prise. Les deux étapes essentielles sont les suivantes :

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

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

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

Tableau. II- 12: Caractéristique physiques et mécaniques du ciment utilisé.

Les résultats obtenus montrent que les masses volumiques (apparente et absolue) du ciment utilisé, déterminées [27], sont incluses dans l'intervalle imposé[29], compris entre 0.900 – 1.100 g/cm³ pour la masse volumique apparente et 2.900 – 3.150 g/cm³ pour la masse volumique absolue.

❖ La surface spécifique de Blaine du ciment :

✓ Principe :

Faire passer, dans des conditions bien définies, une certaine quantité de ciment (par exemple); mesurer le temps de passage, et en déduire la surface spécifique par application d'une formule empirique.

✓ Matériel utilisé :

C'est le perméabilité BLAINE.

Le ciment est placé dans une cellule, dont le volume est limité par un piston (piston qu'on enlève lors de l'essai).

Cette cellule est placée dans l'ajutage conique d'un tube en verre formant manomètre en U ; ce tube comporte 4 traits repère.

Le liquide de ce manomètre en U peut être inspiré par une poire munie d'une soupape, à l'extrémité d'un tube comportant un robinet.

Cellule : tube métallique, dont le volume est limité par :

À la partie inférieure : une grille (trous diam. 1 mm),

À la partie supérieure : un piston Il faut placer deux rondelles de papier filtre, pour éviter toute perte de ciment.

La vitesse d'écoulement de l'air à travers le ciment dépend du tassement de ce ciment dans la cellule, donc de la quantité de ciment qu'on y introduit. Cet état de tassement est caractérisé par sa porosité n .

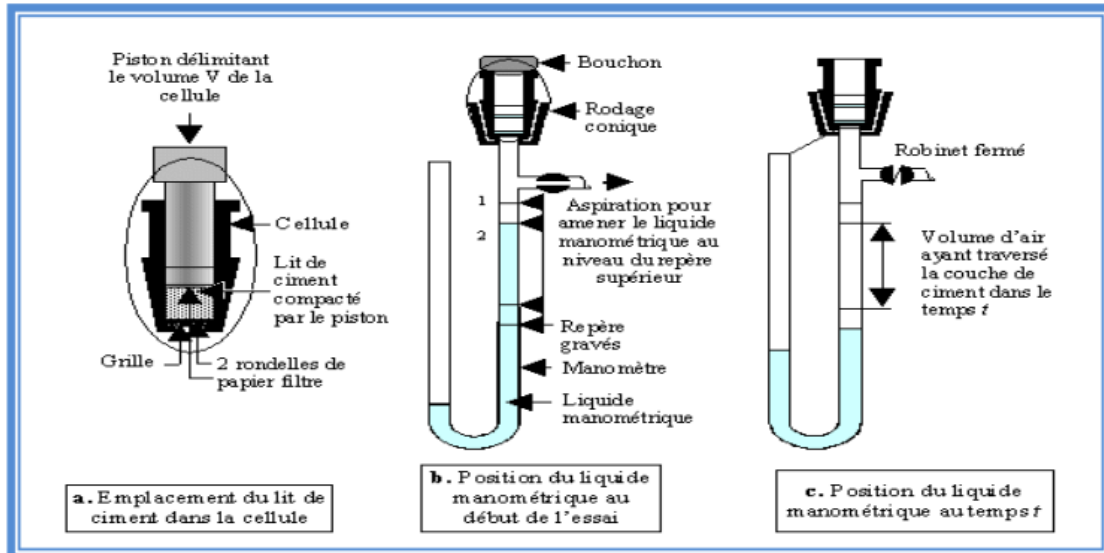


Fig.II- 11: Dispositif expérimental de la perméabilité de Blaine[30]

La masse du ciment est déterminée par :

$$m = mV \text{ abs} \quad m = mV_{\text{abs}} \times (V_{\text{app}} - V_{\text{vides}})$$

Le volume apparent est le volume V de la cellule, et $V_{\text{vides}} = n \cdot V_{\text{app}}$

$$m = mV \text{ abs} (V - n \times V) \quad m = mV_{\text{abs}} \times V \times (1-n)$$

On opère généralement à porosité constante, avec $n = 0,5$. masse volumique absolue du ciment

Il faut donc déterminer la masse volumique absolue du ciment (pycnomètre)

Volume de la cellule :

Pour la détermination du volume de la cellule on emploie le mercure.

1. Placer la grille + 2 rondelles de papier filtre, remplir de mercure et le peser : P1
2. Sur grille = une rondelle, placer un peu plus de ciment que ce que correspondrait à $n = 0,5$ (ainsi le mercure ne tassera pas le ciment : 2,8 à 3,0 g),
3. placer une 2eme rondelle de papier filtre ; enfoncer complètement le piston, puis le retirer,
4. remplir de mercure. Peser ce mercure : P2.

Le volume V de la cellule est celui occupé par le ciment :

$$V = P1 - P2 / m_{\text{vHg}}$$

m_{vHg} : masse volumique du mercure à la température de l'expérience.

✓ Mode opératoire :

1. Placer grille + papier filtre + ciment (quantité calculée) + papier filtre,

2. Tasser et ôter le piston,
3. Vérifier le niveau du liquide : il doit arriver au trait inférieur (4); si nécessaire, parfaire ce niveau,
4. Placer la cellule sur l'ajutage. La jonction doit être étanche (très mince couche de vaseline). S'assurer de l'étanchéité de l'ensemble (boucher la cellule avec le pouce, aspirer avec la poire pour faire monter le liquide aux environs du trait supérieur (1), si on ferme le robinet, le niveau doit rester constant).
5. L'étanchéité étant réalisée, aspirer le liquide jusqu'à ce qu'il atteigne le trait supérieur (1), et fermer le robinet.
6. L'air traverse le ciment, et le niveau du liquide baisse : chronométrer le temps que met le liquide à passer du 2e trait au 3e trait ; soit t (en secondes) la moyenne des temps résultant de 3 mesures consécutives.
7. Noter la température,
8. En déduire la surface spécifique :

$$\mathbf{Ssp} = \frac{K\sqrt{n^3} \sqrt{t_0}}{m_{vabs}(1-n)\sqrt{0,1\eta}} \text{ en } g/cm^2$$

Avec :

K : constante de l'appareil,

n : porosité (en général : 0,50),

$m_{v\text{ abs}}$: masse volumique absolue du ciment,

η : viscosité dynamique de l'air, à la température de l'essai.

Pour faciliter le travail, l'abaque suivant nous permet de déterminer : m_{vHg} , $\sqrt{\eta}$ en fonction de la température de l'essai.



Fig.II- 13: la quantité du ciment.



Fig.II- 12:l'appareille de Blaine

ciment	Temps de broyage	RBP	T1,t2,t3(s)	K	n	T0(s)	M abs (g/cm ³)	η(pas/s)	Ssp (cm ² /g)
CIM	120	5,5PB+4XGB (1,8kg)	59,710	3,133	0,5	58,990	2,81	0,00001818	4490,879
			58,340						
			58,920						

8) Laitier de hauts fourneaux :

A) Origine et formation des laitiers de haut fourneau :

Les laitiers de haut fourneau sont des sous-produits vitreux issus de la fusion des minerais de fer (hématite Fe₂O₃ ou magnétite Fe₃O₄) avec du coke et de la chaux dans un haut fourneau. Lors de la fusion, la fonte liquide (alliage fer-carbone) se sépare du laitier liquide silicaté par différence de densité, la fonte restant au fond et le laitier surnageant. Ce laitier est ensuite refroidi rapidement (trempe) pour former un matériau vitreux, ou refroidi lentement pour cristalliser.[31]

B) Composition chimique :

Les laitiers contiennent principalement quatre oxydes représentant 95 à 97 % de leur masse :

Chaux (CaO) : 38 à 48 %

Silice (SiO₂) : 29 à 41 %

Alumine (Al₂O₃) : 9 à 18 %

Magnésie (MgO) : 1 à 9 %

On trouve aussi des oxydes secondaires comme FeO, MnO, TiO₂, ainsi que du soufre (S) en faible quantité.

C) Caractéristiques minéralogiques et physiques :

Les laitiers cristallisés sont composés essentiellement de silicates ou silico-aluminates de chaux, forme minéralogique stable, sans présence de magnésie ou chaux libres, ce qui élimine

les risques d'instabilité volumique. Ils peuvent être vitreux (granulés) ou cristallisés. Les granulats issus de ces laitiers sont conformes à plusieurs normes françaises et européennes pour leur utilisation en génie civil [32]

D) Applications et formes physiques :

Laitier vitrifié granulé : obtenu par refroidissement rapide dans l'eau, utilisé comme addition dans les ciments (ciment sidérurgique CEM III) et dans la fabrication de béton, grâce à son hydraulité latente.

Laitier cristallisé : refroidi lentement, utilisé en remblai, couche de forme ou ballast dans les travaux publics.

Autres usages : fabrication de laine de verre, verre, enrobés bitumineux, etc.



Fig.II- 14: Laitier de haut fourneau.

9) Eau potable :

L'eau utilisée pour la confection du mortier est celle du robinet du laboratoire de génie civil de l'université d'Ain Temouchent.

Constituants :	Valeurs :
HCO ₃	85.428 mg/L
SO ₄	28.8 mg/L
Chlorure	300 mg/L
Résidu sec	740 mg/L
Dureté	20 °F
PH	5.65

Tableau. II- 13: Résultats d'analyse chimique de l'eau[33]

Tableau II-14 : Résultats d'analyse chimique de l'eau[33]

10) Les fibres :

A. Fibres Métalliques :

Les fibres métalliques, souvent fabriquées à partir de fil d'acier tréfilé, sont utilisées pour améliorer le comportement mécanique du béton, notamment en augmentant sa résistance à la traction, au cisaillement et aux chocs. Elles jouent un rôle crucial dans la réduction de la

fissuration et l'amélioration de la ductilité du béton, ce qui les rend idéales pour des applications telles que les dallages industriels et les tunnels.[34]



Fig.II- 15: La géométrie de fibres métalliques utilisées

➤ Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées :

Les Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées sont résumées dans le tableau suivant :

Fibres	Diamètre (mm)	Langueur (mm)	La densité (g/cm ³)	Résistance à la traction(MPA)	Module de élasticité (Gpa)
Métallique	0.5	30	7.85	1700	150-200

Tableau. II- 14: Caractéristiques Mécanique de fibre utilisée

B. Fibres de polypropylène :

Les fibres de polypropylène sont des fibres synthétiques qui améliorent la ductilité et la résistance aux chocs du béton. Elles sont souvent utilisées pour réduire la fissuration thermique et sont particulièrement efficaces dans des environnements où la résistance chimique est importante. Ces fibres sont faciles à incorporer dans le béton et offrent une bonne résistance aux produits chimiques et aux UV.[35]



Fig.II- 16: La géométrie de fibres polypropylène utilisées

➤ **Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées :**

Les Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées sont résumées dans le tableau suivant :

Fibres	Diamètre (mm)	Langueur (mm)	La densité (g/cm ³)	Résistance à la traction(MPA)	Module de élasticité (Gpa)
Polypropylène	0.05	6	0.900	600	5-10

Tableau. II- 15: Caractéristiques Mécanique de fibre utilisée

C. Fibres de verre :

Les fibres de verre sont utilisées pour renforcer des matrices polymères et sont appréciées pour leur résistance mécanique et chimique. Elles sont souvent employées dans des applications où la résistance à la corrosion est cruciale. Bien que leur efficacité puisse être affectée par l'humidité, elles restent un choix populaire pour des applications structurales légères et des composites avancés.[36]



Fig.II- 17: La géométrie de fibres verre utilisées

➤ **Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées :**

Les Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées sont résumées dans le tableau suivant :

Fibres	Diamètre (mm)	Long (mm)	La densité (g/cm ³)	Résistance à la traction(MPA)	Module de élasticité (Gpa)
Verre	0.3	50	0.935	350	5

Tableau. II- 16: Caractéristiques Mécanique de fibre utilisée

11) Les adjuvants :

Le plastifiant que nous avons utilisé est un plastifiant réducteur d'eau, il est compatible avec tous les types de ciment[37]

➤ Les caractéristiques physiques et chimiques : [38]

- ✚ Apparence : Liquide.
- ✚ Couleur : brun foncé.
- ✚ Densité : 1,20 Kg/L \pm 0,01.
- ✚ PH : 6,5 \pm 1,0.
- ✚ Contenus dans des chlorures solubles dans l'eau (Cl-) : \leq 0.10%.
- ✚ Teneur en alcaline (équivalent Na₂O) : max. 6% en masse.
- ✚ Forte réduction de l'eau : entre 15 et 25% selon les doses utilisées.
- ✚ L'effet plastifiant est maintenu, même dans les climats chauds.



Fig.II- 18: L'adjuvant utilisé

12) Conclusion :

Cette étude a porté sur la caractérisation des matériaux utilisés dans la construction, en mettant l'accent sur leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques. Les résultats obtenus ont permis de mieux comprendre le comportement de ces matériaux sous diverses conditions, ce qui est essentiel pour garantir la sécurité et l'efficacité des structures construites.

Les analyses effectuées ont montré que la sélection appropriée des matériaux, tels que les granulats, les liants, et les fibres, joue un rôle crucial dans l'optimisation des propriétés mécaniques et durables des mortiers. L'utilisation de matériaux alternatifs, comme le laitier, a

également été évaluée, révélant des avantages significatifs en termes de résistance mécanique et de durabilité.

Cette recherche contribue à la compréhension des interactions complexes entre les différents composants des matériaux de construction, permettant ainsi aux ingénieurs et aux architectes de prendre des décisions éclairées lors de la conception et de la réalisation de projets de construction. Enfin, les résultats de cette étude pourraient être appliqués pour améliorer les performances des structures existantes et futures, tout en favorisant l'innovation dans le domaine des matériaux de construction.

CHAPITRE 3

RESULTATATS ET

DISCUSSIONS

1 Introduction

Ce chapitre présente l'analyse détaillée des résultats obtenus lors des essais réalisés sur les mortiers formulés à base de fibres hybrides. Les tests de maniabilité, à travers le maniabilité et l'aéromètre, permettent d'évaluer la fluidité et la consistance des mélanges, essentiels pour garantir une bonne mise en œuvre du mortier. Par la suite, les performances mécaniques sont étudiées via les essais de compression et de flexion, afin de mesurer la résistance et la ductilité du matériau. En complément, les propriétés physiques telles que la conductivité thermique, la porosité, l'absorption d'eau et la vitesse de propagation des ultrasons sont analysées pour mieux comprendre le comportement global du béton hybride. Ces résultats sont discutés en lien avec la formulation adoptée, afin d'optimiser les performances et d'identifier les avantages liés à l'incorporation des fibres hybrides.

2 Les essais de maniabilité :

La maniabilité est une propriété physique spécifique du béton sans tenir compte des conditions particulières d'utilisation pour un type donné d'application. Elle est définie commettant la propriété d'un mortier ou d'un béton fraîchement malaxé qui définit la facilité et l'homogénéité à être malaxé, mis en place, serré et fini [39]

✚ Principe de l'essai :

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

✚ L'appareil utilisé :

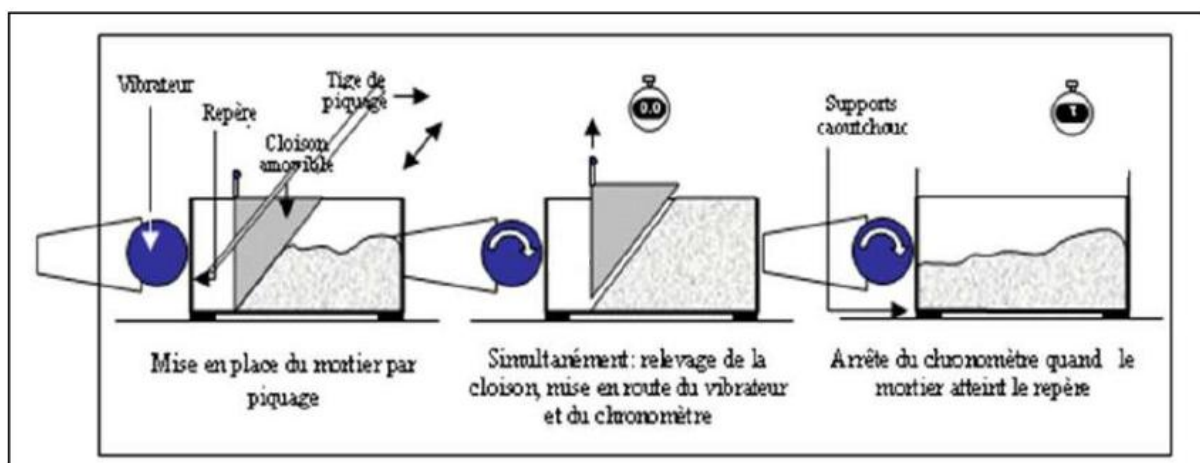


Fig.III- 1 : Principe de fonctionnement du Maniabilité LCL(B)[40]

L'appareil utilisé est appelé Maniabilité LCL (B) (figure II.6), avec illustration par photo II.10. Il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique (7.5cm x 7.5cm x 15cm), posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible

✚ Conduite de l'essai :

Le mortier est introduit dans la partie désigné, délimitée par la cloison et mis en place par piquage en trois couches. Quatre minutes après la fin du malaxage, la cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibreur et le déclenchement d'un chronomètre par l'opérateur. Sous l'effet de la vibration le mortier s'écoule, le chronomètre est arrêté une fois le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier.



Fig.III- 2 : Appareil Maniabilimètre

Le temps t mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance.

Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide ou plus maniable, d'où le nom de l'appareil. Comme illustré au tableau II.13

Classe de consistance	Durée (s)
Ferme	$T \geq 40$
Plastique	$20 < T \leq 30$
Très plastique	$10 < T \leq 20$
fluide	$T \leq 10$

Tableau. III- 1: Classe de consistance selon la durée d'écoulement [40]

	E/C	Temps d'écoulement (s)
Témoin	0,5	12,63
Formulation 1	0,5	11,58
Formulation 2	0,5	10,35
Formulation 3	0,5	10,0
Formulation 4	0,5	9,0

Tableau. III- 2: Résultats de maniabilité

3 Aéromètre à mortier :

Les aéromètres à mortier sont utilisés pour déterminer la teneur en air de la pâte de ciment, du mortier de ciment et du mortier de chaux. Les aéromètres sont fabriqués à partir d'aluminium moulé. La partie supérieure et le pot d'essai inférieur sont maintenus ensemble par un joint d'étanchéité qui s'ajuste facilement à l'aide des deux pinces à ressort. Le manomètre est installé dans la tête et l'échelle fonctionne dans la plage de 0 à 20% en volume. L'air est comprimé avec une pompe à main installée dans le système et la configuration des boutons de test et de correction permet un essai simple et rapide.



Fig.III- 3: Appareil Aéromètre à mortier

Résultat :	
Témoin	16,5
Formulation 1	12,15
Formulation 2	12
Formulation 3	10,45
Formulation 4	10,02

Tableau. III- 3 : Résultats d'Aéromètre à mortier.

4 Formulation du mortier témoin :

Le mortier témoin est un béton de référence qui sert de base pour comparer les performances d'autres formulations, notamment celles incluant des fibres hybrides. Il est essentiel de définir clairement sa composition pour établir un point de comparaison fiable.

5 Formulation des mortiers :

La formulation des mortiers renforcés implique la combinaison optimale de différents composants pour obtenir un matériau avec des propriétés mécaniques et physiques spécifiques.

Le mortier renforcés de fibres, qu'il s'agisse de fibres métalliques, polypropylène et de verre, nécessitent une étude approfondie pour déterminer la quantité et le type de fibres à utiliser, ainsi que les autres ingrédients tels que le ciment, l'eau, et les adjuvants.

6 Composition des mortiers utilisés :

Les compositions des échantillons utilisés dans l'étude pour une éprouvettes (4x4x16) cm dans le tableau suivant :

Béton	E/C	Ciment(g)	Laitier (g)	Sable(g)	Fibres (%)			Adjuvant(%)	Eau (ml)
					F.métallique	F.verre	F.polypropylène		
Témoin	0.5	450	/	1350	/	/	/	225	
Formulation 1	0.5	315	135	1350	2	2	1	2	225
Formulation 2	0.5	270	180	1350	3	1,5	0,5	2	225
Formulation 3	0.5	225	225	1350	1	2	2	2	225
Formulation 4	0.5	180	270	1350	1,5	2	1,5	2	225

Tableau. III- 4: compositions du mortier utilisé

7 Préparation et forme de l'échantillon :

Après une série d'essais nous avons opté pour une formulation finale du mortier pour préparer des éprouvettes (4x4x16) cm, le malaxage a été fait à partir du malaxeur de mortier de laboratoire :



Fig.III- 5: Malaxeur



Fig.III- 4: Moule prismatique
4x4x16

1. Introduction des Constituants :

- **Ordre d'Introduction** : Commencer par introduire le ciment et l'eau pour le mouillage, suivi le sable pour éviter le collage des particules fines au fond du malaxeur.
- **Ajout des Fibres** : Les fibres métalliques et polymères et verre sont ajoutées après le mélange initial de sable et du ciment. Cela permet une répartition uniforme des fibres dans le mélange.

2. Malaxage :

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

Tableau. III- 5: Malaxage du mortiers

Enfin, on procède au remplissage des moules en deux couches suivi d'une vibration en utilisant une table de vibration standard. Après 24 h on procède au démoulage les éprouvettes où ces dernières seront mises dans l'eau pour une conservation durant (7, 28, 60, 90) jours, ce mode de conservation offre au mortier une bonne consistance et lui procure une bonne résistance à la compression et à la traction



Fig.III- 6 : Préparations des éprouvettes des mortiers



Fig.III- 7: Conservation des éprouvettes

8 Les essais mécaniques sur les éprouvettes :

a) Résistance à la flexion [41] :

L'évolution de la résistance à la flexion a été étudiée à l'âge de (7, 28, 60 , 90) jours de conservation dans l'eau, les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

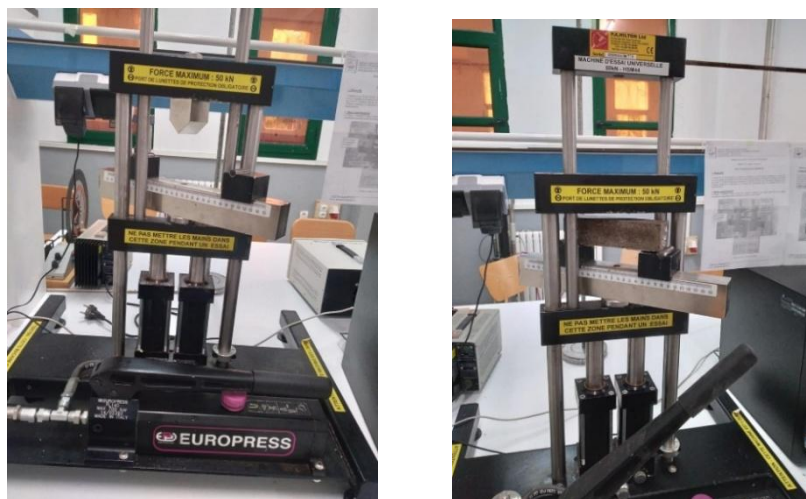


Fig.III- 8: Essai de flexion trois point

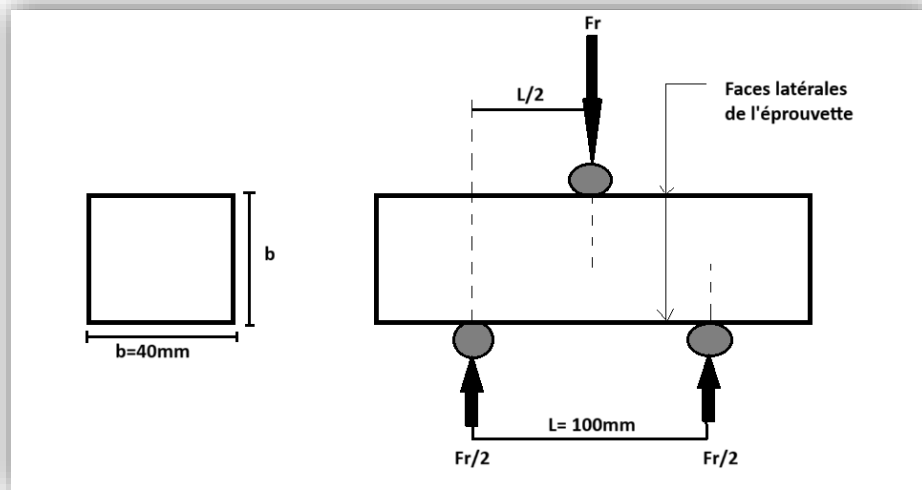


Fig.III- 9: schéma de l'essai de flexion de l'éprouvette 4*4*16

-Si P est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut $P \cdot L/4$ et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette.

-Rf (en N/mm²) est calculée au moyen de la formule : $Rf = 1,5 \times \frac{P \times L}{b^3}$

Avec :

✚ Rf : La résistance en flexion, en newtons par millimètre carré ou en MPA.

	Force de flexion de 7 j (KN)	La contrainte(MPA)	Force de flexion l'âge de 28 j (KN)	La contrainte(MPA)	Force de flexion l'âge de 60 j (KN)	La contrainte(MPA)	Force de flexion l'âge de 90 j (KN)	La contrainte(MPA)
Témoins	2,2	5,16	2,4	5,63	3,1	7,27	2,4	5,63
Formulation 1	2,3	5,39	2,42	5,67	2,9	6,8	3,0	7,03
Formulation 2	2,41	5,65	2,63	6,16	2,83	6,63	2,95	6,9
Formulation 3	2,38	5,58	2,54	5,95	2,66	6,23	2,75	6,45
Formulation 4	2,29	5,37	2,45	5,74	2,58	6,05	2,6	6,1

Tableau. III- 6: valeurs de Résistance à la flexion

- ✚ b : Le côté de la section carrée du prisme en (mm).
- ✚ P : La charge appliquée au milieu du prisme à la rupture en (N).
- ✚ L : La distance entre les appuis en (mm).

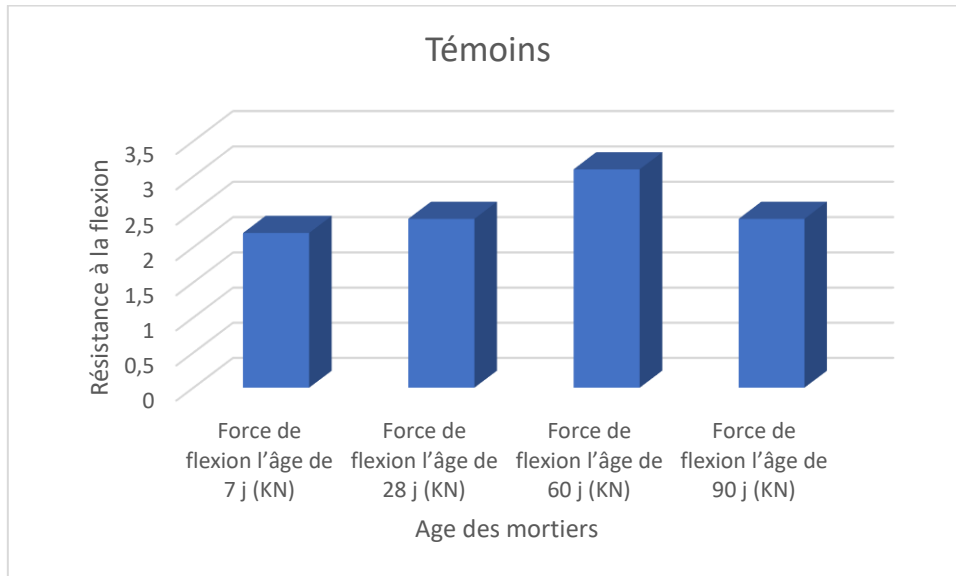


Fig.III- 10: variation de la résistance à la flexion en fonction du temps (témoin)

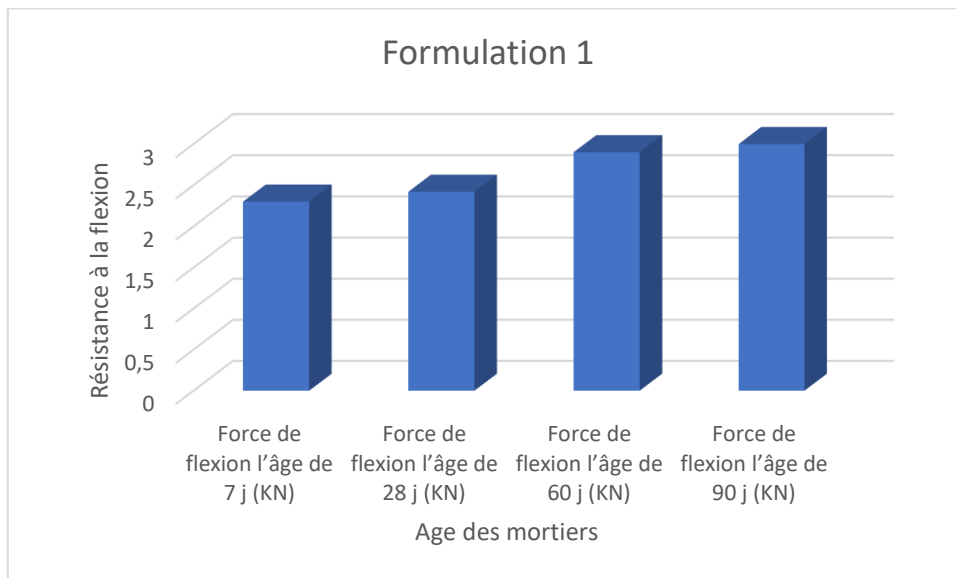


Fig.III- 11: variation de la résistance à la flexion en fonction du temps (formulation 1)

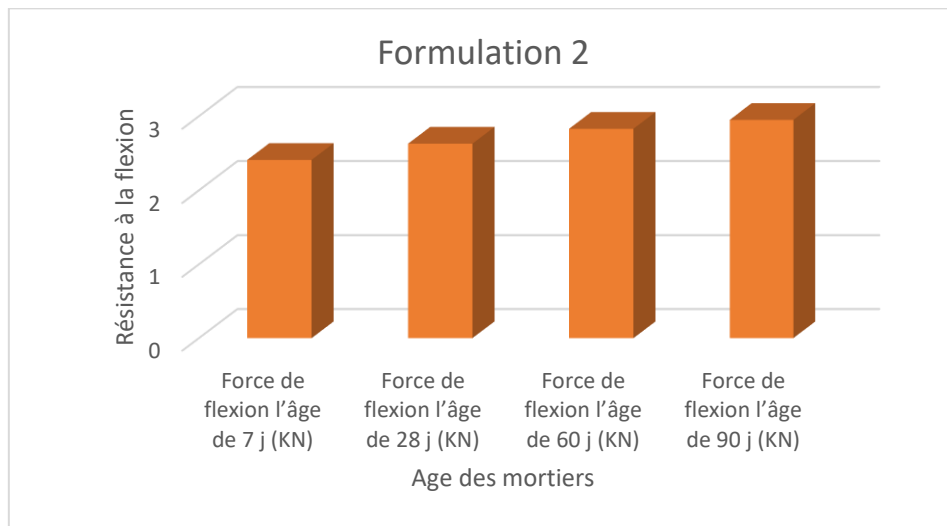


Fig.III- 12: variation de la résistance à la flexion en fonction du temps (formulation 2)

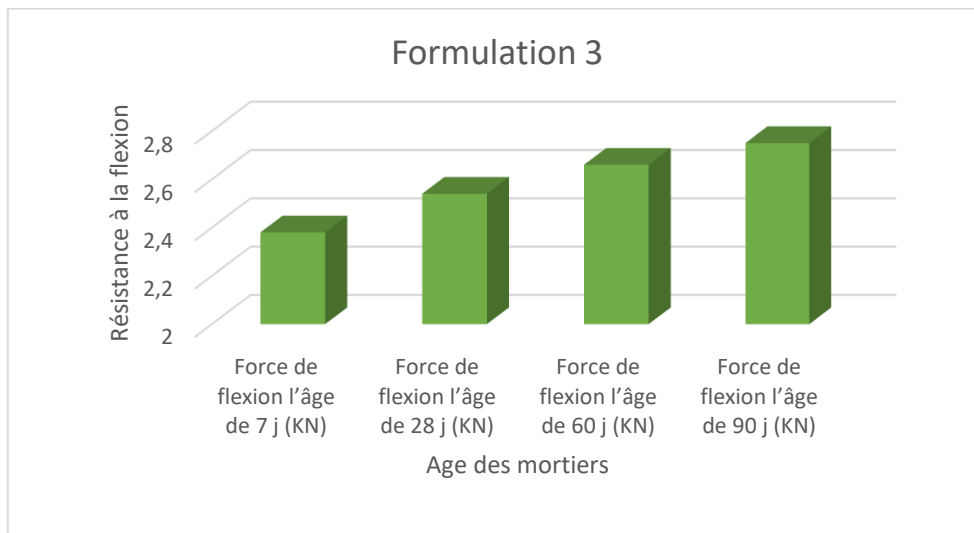


Fig.III- 13: variation de la résistance à la flexion en fonction du temps (formulation 3)

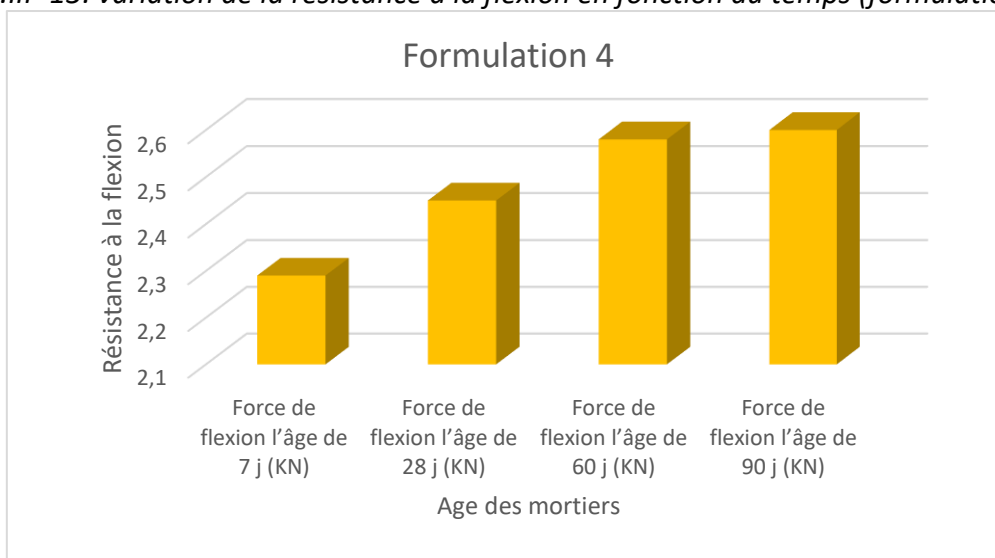


Fig.III- 14: variation de la résistance à la flexion en fonction du temps (formulation 4)

La résistance à la flexion a été déterminée à l'aide de la méthode de la charge concentrée appliquée en milieu de portée, en utilisant un dispositif normalisé de flexion en trois points.

L'essai consiste à exercer une charge verticale, via le rouleau de chargement, sur la face latérale opposée du prisme, en l'augmentant de manière constante jusqu'à la rupture de l'éprouvette

✓ **Commentaires :**

Révèle l'impact combiné de la substitution partielle du ciment par du laitier granulé de haut fourneau et de l'introduction de fibres hybrides sur les performances mécaniques du béton. Le béton témoin, sans ajout de laitier ni de fibres, atteint une résistance maximale à 60 jours (~3,2 kN), avant de connaître une légère diminution à 90 jours, possiblement due à des phénomènes de retrait ou de microfissuration interne.

Les formulations enrichies en laitier et en fibres présentent, quant à elles, une progression régulière de la résistance à la flexion avec le temps. La formulation 1, contenant 30 % de laitier et une combinaison équilibrée de fibres métalliques (2 %), de fibres de verre (2 %) et de fibres de polypropylène (1 %), offre la meilleure performance à long terme, atteignant environ 3,2 kN

à 90 jours. Cette amélioration significative peut être attribuée à l'effet synergique des fibres, qui limitent la propagation des fissures, et à l'activité pouzzolanique du laitier, qui densifie la matrice cimentaire.

La formulation 2 (40 % de laitier, 3 % de fibres métalliques) affiche également une résistance élevée (~3,1 kN à 90 jours), soulignant l'efficacité des fibres métalliques dans la reprise des contraintes en traction. En revanche, les formulations 3 et 4, caractérisées par des taux plus élevés de laitier (50 % et 60 %, respectivement) et une proportion plus importante de fibres de verre et de polypropylène, présentent des résistances légèrement inférieures (~2,85–2,9 kN).

Cela suggère qu'un excès de substitution du ciment peut compromettre la résistance mécanique, malgré l'effet bénéfique des fibres.

En conclusion, ces résultats mettent en évidence l'existence d'un seuil optimal de substitution du ciment (autour de 30–40 %) et l'intérêt de l'utilisation combinée de fibres hybrides pour améliorer la performance en flexion du béton à long terme.

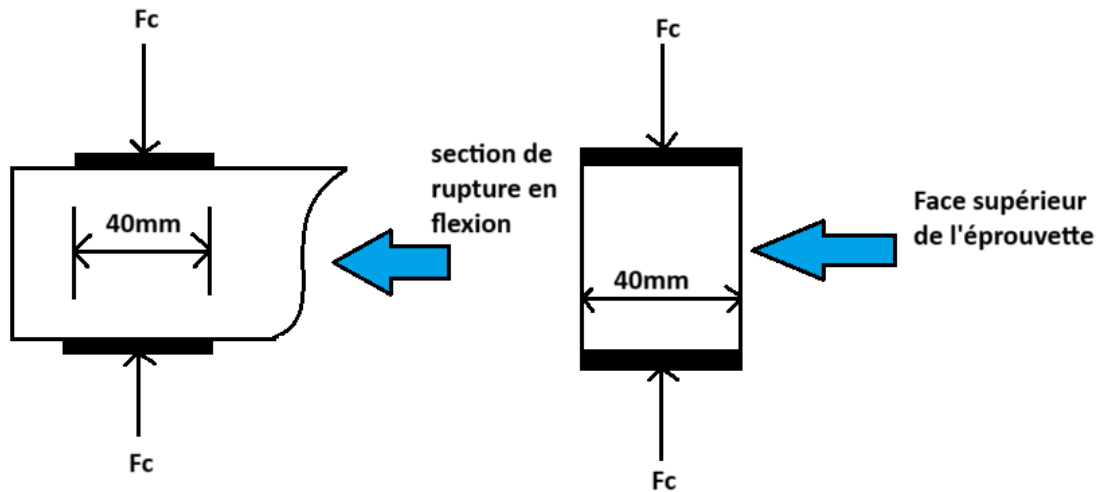


Fig.III- 15: schéma de l'essai de flexion de l'éprouvette 4*4*16

b) Résistance à la compression :

L'évolution de la résistance à la compression a été étudiée à l'âge de (7, 28, 60 , 90) jours de conservation dans l'eau, les résultats sont présentés dans le tableau suivant :



Fig.III- 16: Essai de compression.

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

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

Chapitre 3 : RESULTATSET DISCUTIONS

	Force de compression l'âge de 7 j (KN)	La contrainte(MPA)	Force de compression l'âge de 28 j (KN)	La contrainte(MPA)	Force de compression l'âge de 60 j (KN)	La contrainte(MPA)	Force de compression l'âge de 90 j (KN)	La contrainte(MPA)
Témoins	37,2	23,25	43,8	27,38	55,0	34,38	63,4	39,63
Formulation 1	39,7	24,81	45,4	28,36	56,5	35,31	57,2	35,75
Formulation 2	38,1	23,81	44,5	27,81	54,9	34,31	55,6	34,75
Formulation 3	37,5	23,44	43,2	27,0	53,3	33,31	55,01	34,38
Formulation 4	36,8	23,0	42,9	26,81	50,2	31,38	51,0	31,88

Tableau. III- 7 : valeurs de Résistance à la compression

Avec :

- ✚ **RC** : Résistance à la compression en (MPA).
- ✚ **FC** : Charge de rupture en (N).
- ✚ **b** : Côte de l'éprouvette est égale à 40mm.

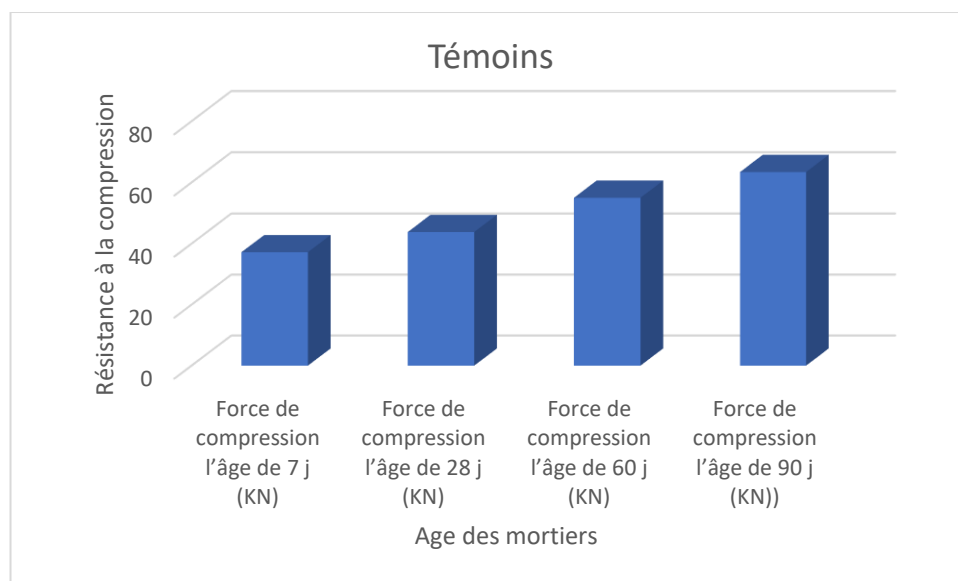


Fig.III- 17: variation de la résistance à la compression en fonction du temps (témoin)

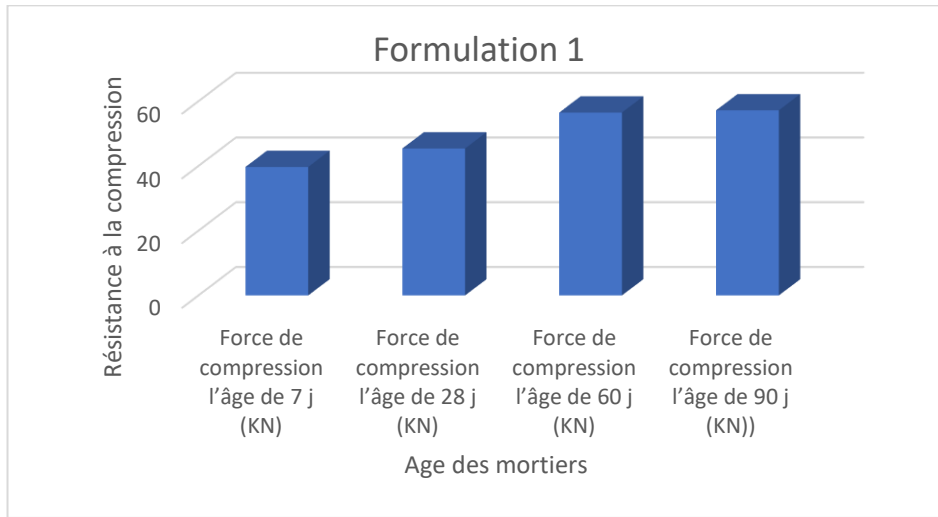


Fig.III- 18:variation de la résistance à la compression en fonction du temps(formulation1)

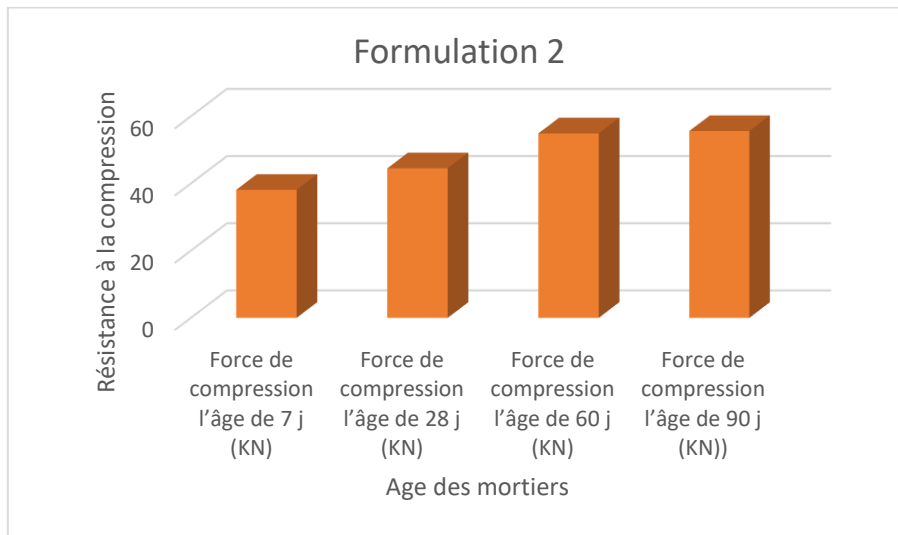


Fig.III- 19:variation de la résistance à la compression en fonction du temps(formulation2)

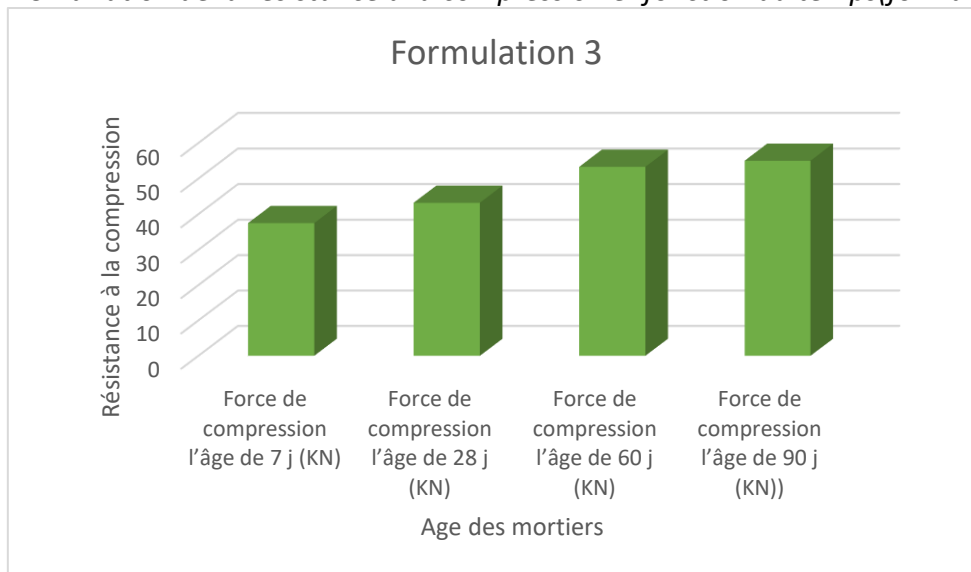


Fig.III- 20:variation de la résistance à la compression en fonction du temps(formulation3)

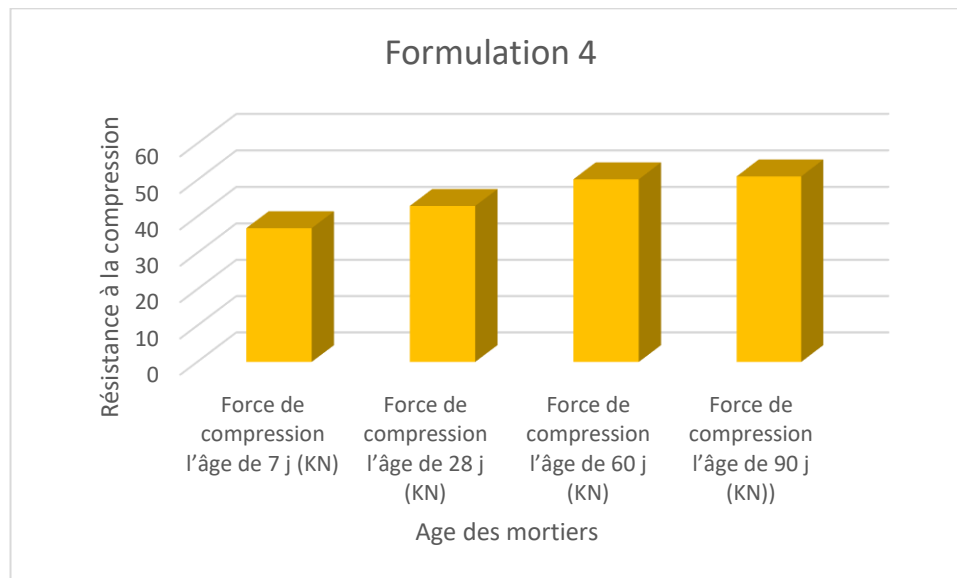


Fig.III- 21:variation de la résistance à la compression en fonction du temps(formulation4)

L'essai consiste à centrer chaque demi-prisme, issu de l'essai de flexion, sur les plateaux de la machine avec une précision de $\pm 0,5$ mm latéralement, et à les positionner longitudinalement de manière à laisser un porte-à-faux d'environ 10 mm. La charge de compression est ensuite appliquée à vitesse constante jusqu'à la rupture de l'éprouvette

✓ **Commentaires :**

Toutes les formulations montrent une progression continue des résistances mécaniques entre 7 et 90 jours. Le béton témoin, formulé sans laitier ni fibres, présente une performance élevée à 90 jours (~66 MPa), attribuable à la teneur élevée en ciment Portland. Les formulations contenant du laitier et des fibres hybrides (F1 à F4) démontrent des résistances légèrement inférieures mais très proches, variant entre 59 et 61 MPa à 90 jours.

La formulation 1, contenant 30 % de laitier et une combinaison équilibrée de fibres métalliques (2 %), de verre (2 %) et de polypropylène (1 %), offre la résistance à la compression la plus élevée parmi les formulations modifiées (~61 MPa). Cela indique qu'une substitution modérée du ciment permet de conserver une bonne activité hydraulique tout en bénéficiant des effets synergiques des fibres. En revanche, les formulations 3 et 4, avec une substitution plus importante du ciment (50–60 % de laitier), montrent une légère baisse des performances, suggérant que le remplacement excessif du ciment affecte la densité et la compacité de la matrice.

Il est important de noter que l'ajout de fibres n'a pas significativement accru la résistance à la compression, ce qui est attendu, car les fibres ont un impact plus marqué sur la

résistance à la traction et à la flexion. Néanmoins, leur présence semble favoriser la stabilité du développement des résistances dans le temps et peut contribuer à une meilleure durabilité à long terme.

9 Les essais sur mortier à l'état durci :

i. Ultra son :

-Le contrôle par ultrasons est une méthode non destructive de contrôle de l'homogénéité du mortier. Il consiste à mesurer la vitesse de propagation des impulsions ultrasonores et permet de tester in situ la résistance du béton. Cette méthode permet de mesurer le temps de transit d'une impulsion ultrasonore à travers le mortier. Les principales caractéristiques de tous les appareils disponibles sur le marché sont très similaires. Ces dispositifs comprennent des générateurs d'impulsions et des récepteurs d'impulsions.

-Comme toutes les méthodes d'inspection non destructives, l'inspection par ultrasons permet de caractériser les défauts contenus dans les structures et d'évaluer l'acceptabilité des pièces fabriquées sans affecter l'intégrité structurelle. Cette méthode peut être utilisée à différentes étapes du développement de l'ouvrage considéré (fabrication, mise en service, réparation). Il ne quantifie pas l'erreur, mais nécessite une comparaison avec des normes. De plus, la limite et la probabilité de détection diffèrent selon l'équipement, le matériau, la surface d'inspection et l'opérateur.

✓ But :

Le but de cet essai est de mesurer la vitesse de propagation des ondes longitudinales à travers des éléments en béton ou mortier.

✓ Principe :

Le principe de cette méthode est de mesurer le temps mis par une onde longitudinale (onde de pression) pour se propager sur une certaine distance et, par conséquent, la vitesse de propagation correspondante de cette onde dans le béton ou le mortier.

✓ Mode opératoire :

- Pour la mise en route de l'appareil il faut :
- Assurez-vous que les piles sont installées correctement.

Chapitre 3 : RESULTATSET DISCUTIONS

- Connecter les deux transducteurs, qui peuvent être indifféremment émetteur et transducteur, avec deux câbles.
- Allumez l'appareil avec un interrupteur.
- L'appareil est maintenant prêt pour le test livraison.
- Choisissez une surface d'essai de préférence lisse et exempte de fissures. Appliquer une fine couche de produit de couplage sur chaque transducteur.
- Placer et appuyer les transducteurs sur la surface. L'opérateur déplacera légèrement les sondes en maintenant la pression pour obtenir la valeur stable la plus faible, qui sera considérée comme valeur à retenir.

✓ Description de l'appareil ultra son :

-Un dispositif d'auscultation dynamique génère une impulsion ultrasonore, qui est émise lorsque l'ultrason touche la zone à évaluer. Le temps nécessaire pour traverser le mortier est visualisé sur un afficheur digital.



Fig.III- 22: Appareil de l'ULTRASON.

	La vitesse (m/s)	La vitesse (m/s)	La vitesse (m/s)	La vitesse (m/s)
	7 j (MPA)	28 j (MPA)	60 j (MPA)	90 j (MPA)
Témoins	3579	3602	3774	3867
Formulation 1	4637	4672	4709	4812
Formulation 2	4563	4566	4580	4654
Formulation 3	4256	4360	4463	4513
Formulation 4	3988	3995	3998	4077

Tableau. III- 8: La vitesse de propagation

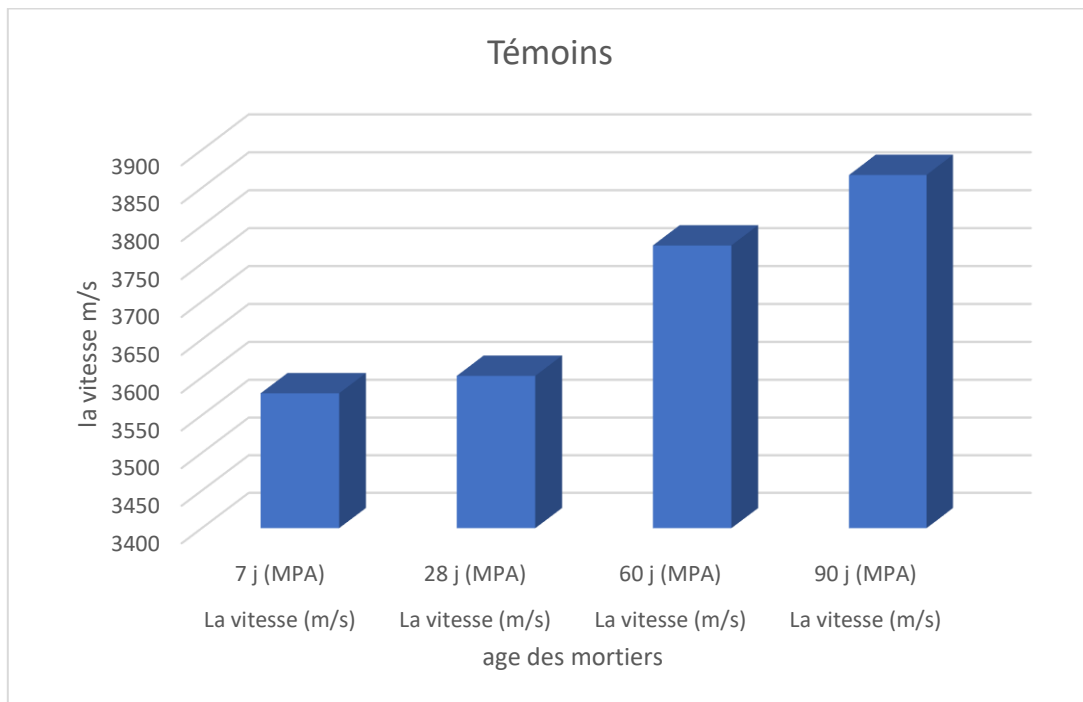


Fig.III- 23: La vitesse de propagation (témoin)

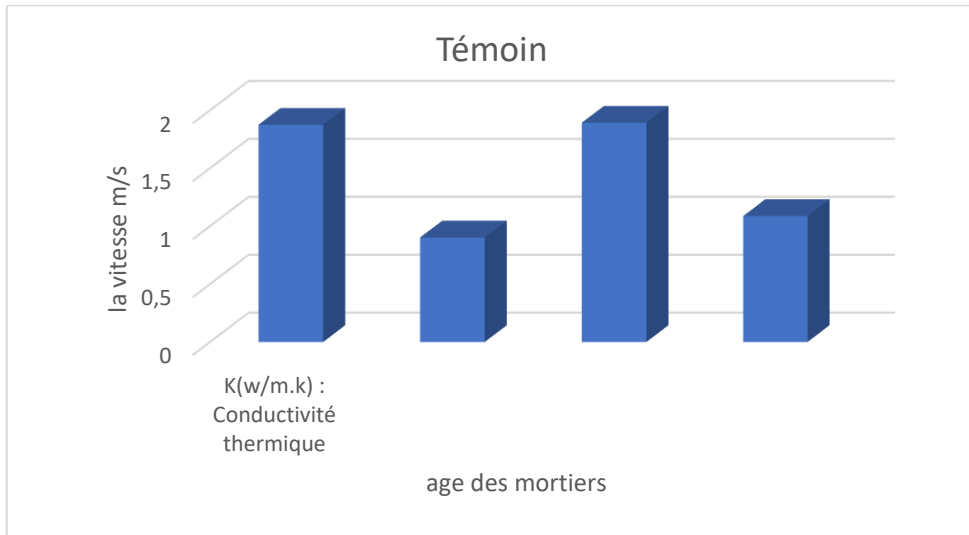


Fig.III- 24 : La vitesse de propagation (formulation1)

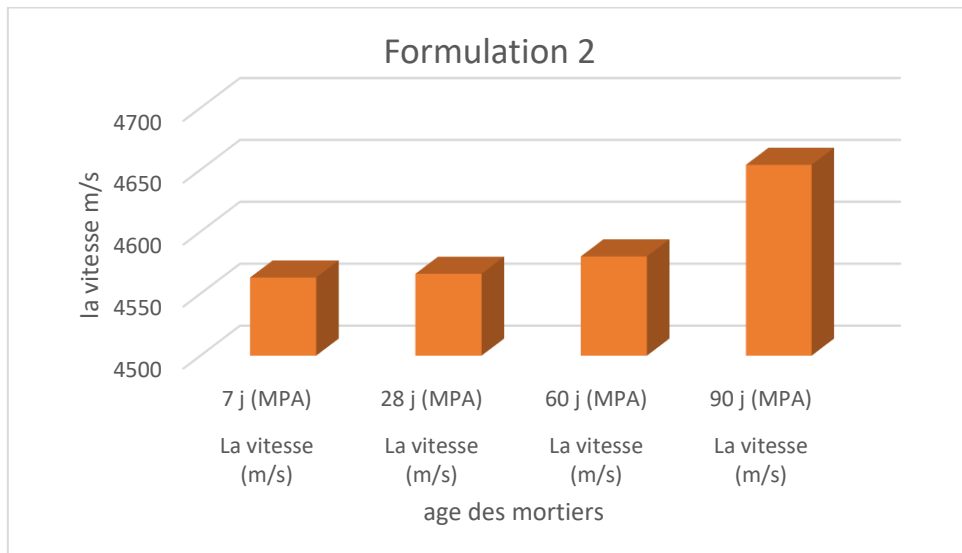


Fig.III- 25: La vitesse de propagation (formulation2)

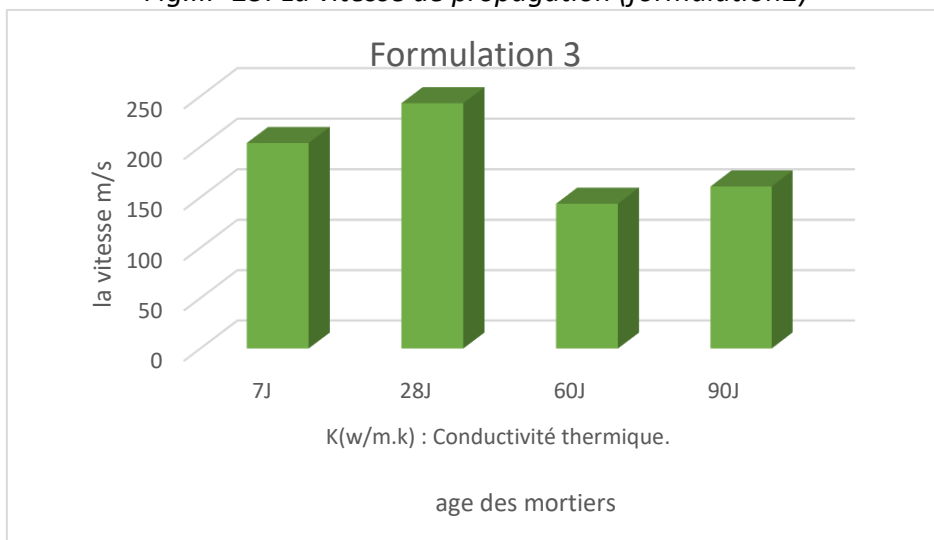


Fig.III- 26: La vitesse de propagation(formulation3)

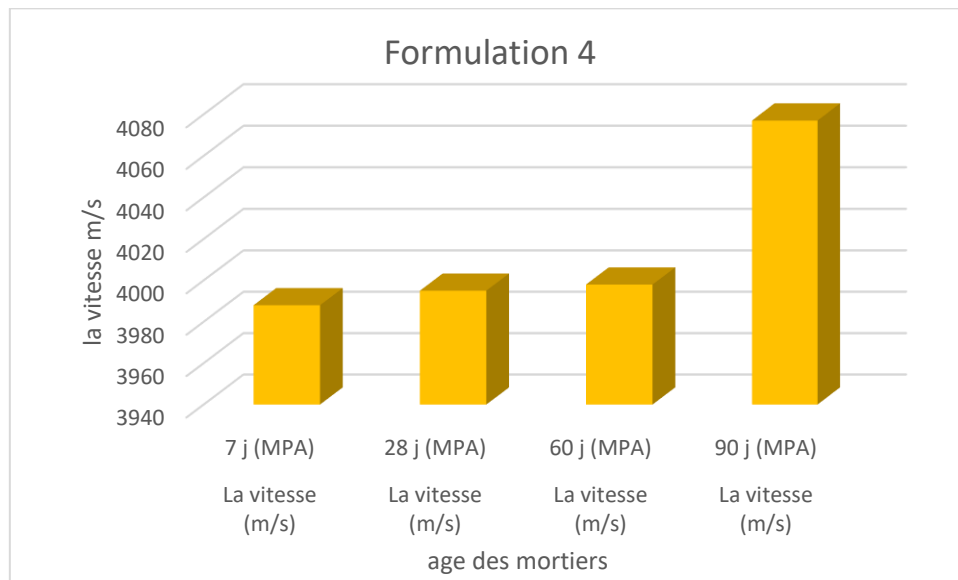


Fig.III- 27: La vitesse de propagation (formulation4)

✓ **Commentaires :**

Le mortier témoin, formulé sans laitier ni fibres, affiche une vitesse relativement plus faible à tous les âges (de l'ordre de 3700 m/s à 4100 m/s), ce qui reflète une structure moins dense par rapport aux formulations modifiées. À 90 jours, la vitesse atteint environ 4100 m/s, indiquant une bonne compacité attribuable à la forte teneur en ciment Portland.

Les formulations 1 et 2, intégrant du laitier et des fibres hybrides, montrent les vitesses ultrasoniques les plus élevées parmi les formulations testées, dépassant 4900 m/s à 90 jours. La formulation 1, avec 30 % de laitier et une combinaison équilibrée de fibres métalliques (2 %), de verre (2 %) et de polypropylène (1 %), atteint la vitesse maximale, ce qui suggère une matrice particulièrement dense et homogène. Cela indique qu'une substitution modérée du ciment par du laitier, associée à une synergie de fibres, optimise la compacité et la cohésion du matériau.

La formulation 2, avec 40 % de laitier et une proportion légèrement supérieure de fibres métalliques (3 %), présente également une vitesse élevée, proche de celle de la formulation 1, confirmant l'effet bénéfique des fibres sur la densification du réseau cimentaire.

En revanche, les formulations 3 et 4, caractérisées par une substitution plus importante du ciment (50–60 % de laitier), affichent des vitesses légèrement inférieures (autour de 4500 m/s à 90 jours). Cette diminution suggère qu'un remplacement excessif du ciment par du laitier réduit la densité et la compacité de la matrice, probablement en raison d'une activité hydraulique moindre et d'une microstructure plus poreuse.

Il est à noter que l'ajout de fibres, bien qu'ayant peu d'effet sur la résistance à la compression, contribue à la stabilité du développement de la densité dans le temps, comme l'indique la progression régulière des vitesses ultrasoniques. La présence de fibres favorise également une meilleure cohésion interne et pourrait améliorer la durabilité à long terme du matériau.

ii. Essai d'absorption d'eau :

-L'absorption capillaire mesure l'absorption d'eau due à l'effet de mèche capillaire d'échantillons de mortier insaturé en contact avec de l'eau sans pression hydraulique.

✓ **But :**

-Cet essai pour déterminer le coefficient d'absorption des différentes éprouvettes des mortiers.

✓ **Principe :**

-Le coefficient d'absorption est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon après absorption d'eau à la masse sèche de l'échantillon. Cette absorption est réalisée en immergeant les échantillons dans de l'eau à 24°C pendant 5 min ; 10 min; 15min ; 20min ; 30min ; 60min ; 90mi ;et 24 h

-Le coefficient d'absorption d'eau définie par la relation suivante :

$$Ab=(Ma-MS)/(Ms) \times 100$$

-Avec :

- **Ms** : Masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 °C.
- **Ma** : Masse de l'échantillon imbibé, surface sèche déterminée comme suit.

✓ **Mode opératoire :**

- Mesurer la masse des éprouvettes avant l'essai.
- Elles sont placées sur des supports adéquats dans un bac plein d'eau.
- La face clivée de l'éprouvette est immergée dans 5 à 10 mm d'eau pendant une durée spécifique.
- Laissez les éprouvettes dans l'eau à temps de 5 min ; 10 min; 15min ; 20min ; 30min ; 60min ; 90min ;et 24 h.
- Prenez les éprouvettes et mesurer la masse après le temps précisé.
- Calculer le coefficient d'absorption

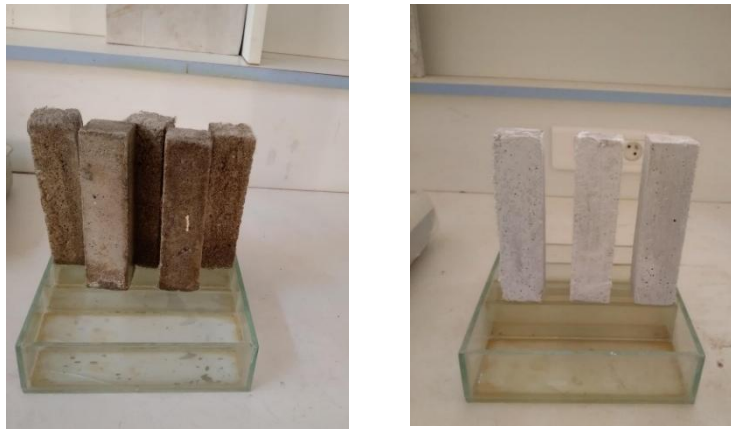


Fig.III- 28:Essai d'absorption par capillarité

Tableau. III- 9: Essai d'absorption d'eau (7J)

les éprouvettes	La durée								
	Masse sèche	5min	10min	15min	20min	30min	60min	90min	24h
Témoins	568,68	569,21	569,31	569,54	569,73	569,78	570,21	570,67	573,44
F1	485,85	487,09	487,51	487,82	488,1	488,58	488,91	489,68	489,94
F2	433,68	436,65	436,87	437,15	437,34	437,38	438,42	438,8	440,65
F3	440,17	447,86	448,4	449,13	450,12	450,32	450,52	454,05	456,12
F4	424,6	430,34	430,82	431,64	432,64	433,16	435,95	437,3	439,36

Tableau. III- 10: Coefficient d'absorption d'eau dans un temps différent (7J)

les éprouvettes	La durée							
	5min	10min	15min	20min	30min	60min	90min	24h
Témoins	0,093	0,111	0,151	0,185	0,193	0,267	0,349	0,837
F1	0,255	0,341	0,406	0,462	0,563	0,631	0,788	0,844
F2	0,685	0,735	0,800	0,864	0,853	1,093	1,182	1,608
F3	1,751	1,872	2,037	2,259	2,305	2,361	3,579	3,630
F4	1,354	1,466	1,663	1,896	2,014	2,674	2,983	3,469

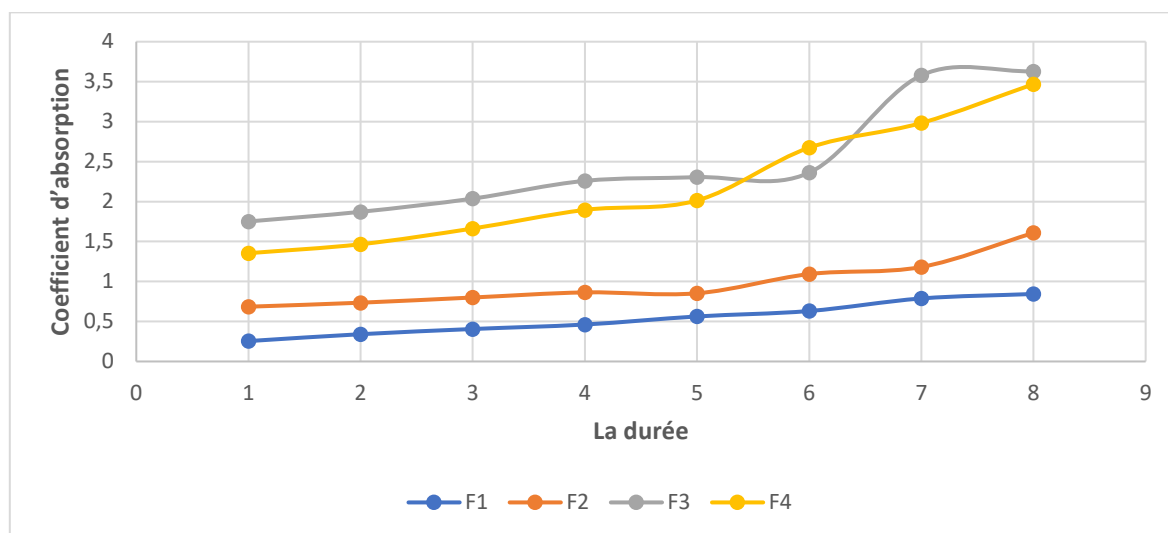


Fig.III- 29: Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps (7J).

✓ **Commentaires :**

Le graphe présente l'évolution du coefficient d'absorption d'eau des différentes formulations de mortiers au jeune âge (7 jours) en fonction du temps d'immersion. On observe que le mortier témoin (sans laitier ni fibres) présente le plus faible coefficient d'absorption, traduisant une matrice plus dense et moins poreuse. Les formulations F1 et F2, enrichies en laitier et en fibres, montrent des coefficients légèrement plus élevés mais restent inférieurs à ceux des formulations F3 et F4, qui affichent les valeurs d'absorption les plus importantes. Cette augmentation du coefficient pour F3 et F4 s'explique par une substitution plus importante du ciment par du laitier et une teneur plus élevée en fibres, ce qui accroît la porosité et la capacité d'absorption du matériau. Ainsi, la compacité du mortier diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment et des fibres, ce qui se traduit par une absorption d'eau plus élevée. Ce résultat met en évidence l'influence de la composition sur la durabilité et la porosité des mortiers à jeune âge.

Tableau. III- 11: Essai d'absorption d'eau (28J)

les éprouvettes	La durée								
	Masse sèche	5min	10min	15min	20min	30min	60min	90min	24h
Témoins	546,47	546,74	546,96	546,98	547,22	547,53	548,11	549,31	550,42
F1	411,6	412,9	413,1	413,2	413,6	413,8	414,2	414,6	416,62
F2	454,76	455,65	455,75	456,25	456,67	456,83	457,26	457,77	459,3
F3	458,3	460,5	460,6	460,9	461,4	461,6	461,8	462,24	463,33
F4	433,7	443,9	444,8	446,2	446,9	447,9	449,2	451,6	453,87

Tableau. III- 12 : Coefficient d'absorption d'eau dans un temps différent (28J)

les éprouvettes	La durée							
	5min	10min	15min	20min	30min	60min	90min	24h
Témoins	0,049	0,090	0,093	0,137	0,194	0,301	0,521	0,723
F1	0,316	0,365	0,390	0,487	0,537	0,632	0,729	1,222
F2	0,196	0,218	0,328	0,419	0,456	0,551	0,662	0,998
F3	0,479	0,502	0,566	0,676	0,723	0,764	0,860	1,097
F4	2,352	2,554	2,856	3,118	3,278	3,292	4,129	4,659

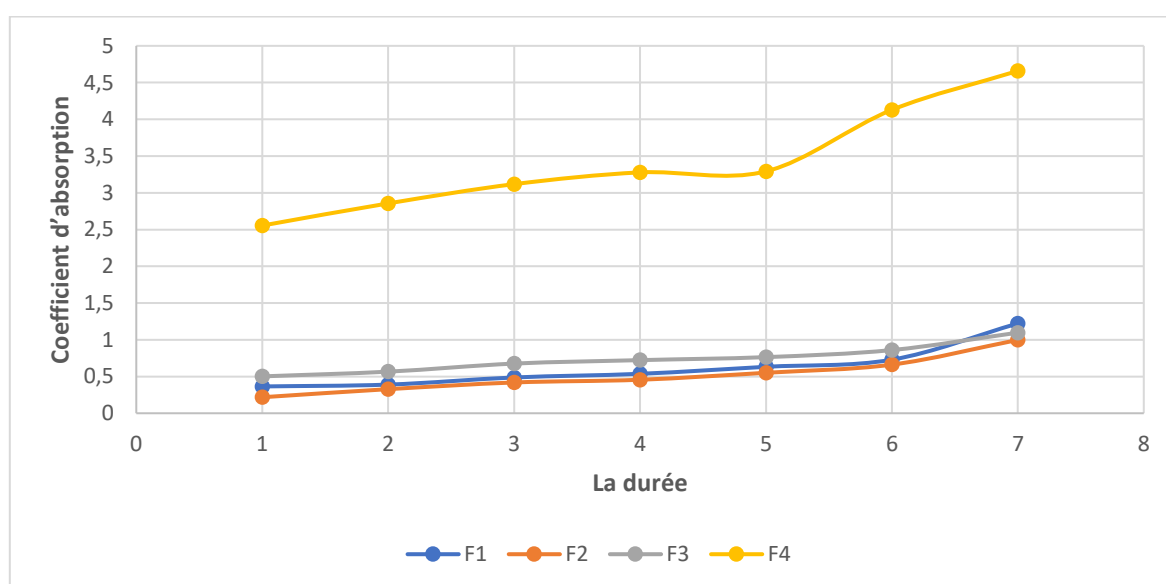


Fig.III- 30: Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps (28J).

✓ **Commentaires :**

Le mortier témoin (sans laitier ni fibres) présente le coefficient d'absorption le plus élevé durant toute la période d'essai. Cette forte absorption traduit une structure plus poreuse et moins compacte, ce qui favorise la pénétration de l'eau.

Les formulations F1, F2, F3 et F4, toutes enrichies en laitier et en fibres, affichent des coefficients d'absorption nettement inférieurs à celui du témoin. Cela indique que

Chapitre 3 : RESULTATSET DISCUSSIONS

l'incorporation de laitier et de fibres améliore la compacité de la matrice et réduit la porosité, limitant ainsi l'absorption d'eau.

Parmi ces formulations, F1 et F2 présentent les valeurs d'absorption les plus faibles, suggérant un effet optimal des proportions modérées de laitier et de fibres sur la densification de la matrice.

F3 et F4, qui contiennent les plus fortes proportions de laitier (225 g et 270 g respectivement) et des teneurs élevées en fibres, montrent une légère augmentation du coefficient d'absorption par rapport à F1 et F2, mais restent largement inférieures au témoin. Cela peut s'expliquer par le fait qu'un excès de laitier et de fibres peut entraîner une augmentation de la porosité, réduisant ainsi la performance d'étanchéité du mortier.

Tableau. III- 13: Essai d'absorption d'eau (60J)

les éprouvettes	La durée								
	Masse sèche	5min	10min	15min	20min	30min	60min	90min	24h
Témoins	547,86	548,43	548,48	548,66	548,9	549,05	549,53	550,11	551,98
F1	488,9	490,16	490,19	490,42	490,53	490,62	491,0	491,63	493,75
F2	460,16	461,05	461,12	461,16	461,27	461,4	461,86	462,16	464,13
F3	448,3	449,05	449,42	449,74	450,18	451,34	451,79	453,09	454,31
F4	440,11	443,23	444,13	444,66	445,05	446,12	447,43	448,6	450,76

Tableau. III- 14: Coefficient d'absorption d'eau dans un temps diffèrent (60J)

les éprouvettes	La durée							
	5min	10min	15min	20min	30min	60min	90min	24h
Témoins	0,104	0,113	0,146	0,190	0,217	0,305	0,411	0,751
F1	0,258	0,264	0,311	0,333	0,352	0,428	0,559	0,992
F2	0,193	0,209	0,217	0,241	0,242	0,270	0,435	0,866
F3	0,167	0,250	0,321	0,323	0,419	0,676	1,070	1,118
F4	0,709	0,914	1,091	1,036	1,124	1,368	1,922	2,425

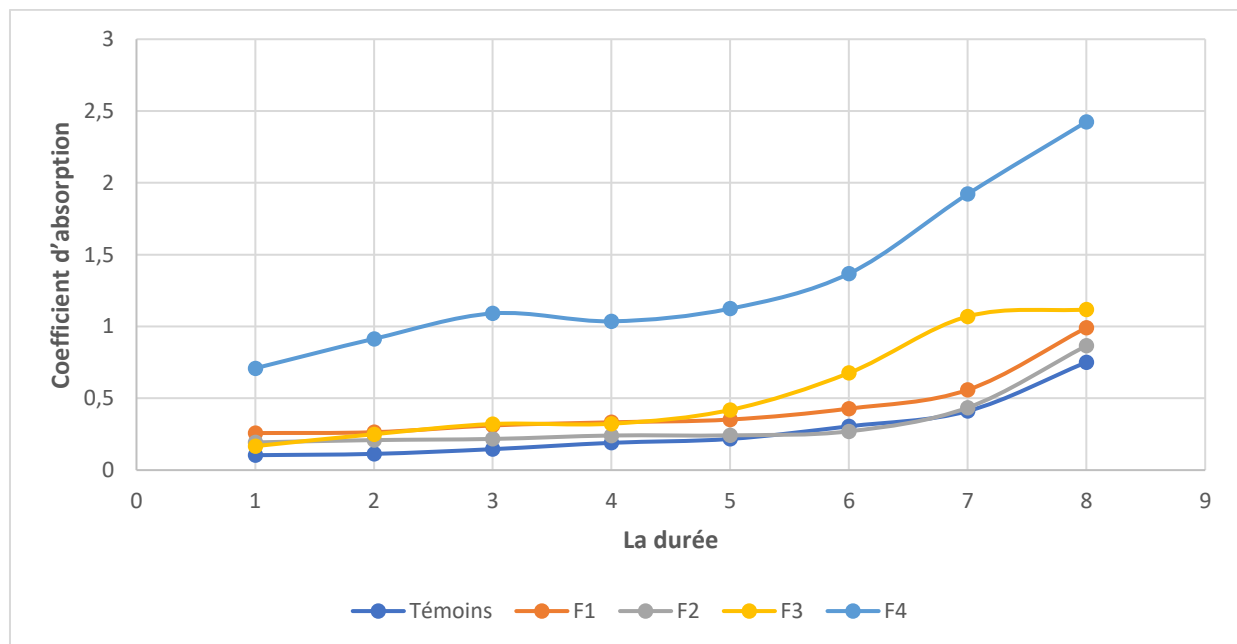


Fig.III- 31: Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps (60J).

✓ **Commentaires :**

La composition du mortier influence fortement sa capacité d'absorption d'eau à 60 jours. L'ajout raisonné de laitier et de fibres permet de limiter l'absorption et d'améliorer la compacité, tandis qu'un excès peut réduire cet effet bénéfique. Le mortier témoin, sans ajouts,

reste le plus vulnérable à la pénétration de l'eau, soulignant l'intérêt des formulations enrichies pour la durabilité des matériaux.

Tableau. III- 15: Coefficient d'absorption d'eau dans un temps différent (90J)

les éprouvettes	La durée							
	5min	10min	15min	20min	30min	60min	90min	24h
Témoins	0,396	0,567	0,670	0,713	0,714	0,890	1,249	1,994
F1	0,211	0,308	0,306	0,466	0,598	0,621	0,868	1,564
F2	0,286	0,329	0,467	0,573	0,668	0,780	1,094	1,587
F3	0,233	0,276	0,275	0,400	0,797	0,814	0,867	1,338
F4	0,771	1,263	1,092	1,267	1,385	1,489	1,664	2,455

Tableau. III- 16: Essai d'absorption d'eau (90J)

les éprouvettes	La durée								
	Masse sèche	5min	10min	15min	20min	30min	60min	90min	24h
Témoins	551,3	553,49	554,43	554,98	555,23	556,21	558,2	559,4	562,3
F1	473,3	474,3	474,75	475,5	476,13	476,23	477,4	478,3	480,7
F2	474,4	475,76	476,6	477,12	477,56	478,47	479,39	480,6	481,9
F3	448,2	449,24	449,48	450,0	451,78	451,86	452,1	452,76	454,2
F4	412,18	415,37	416,69	417,4	417,88	418,31	419,03	420,55	422,32

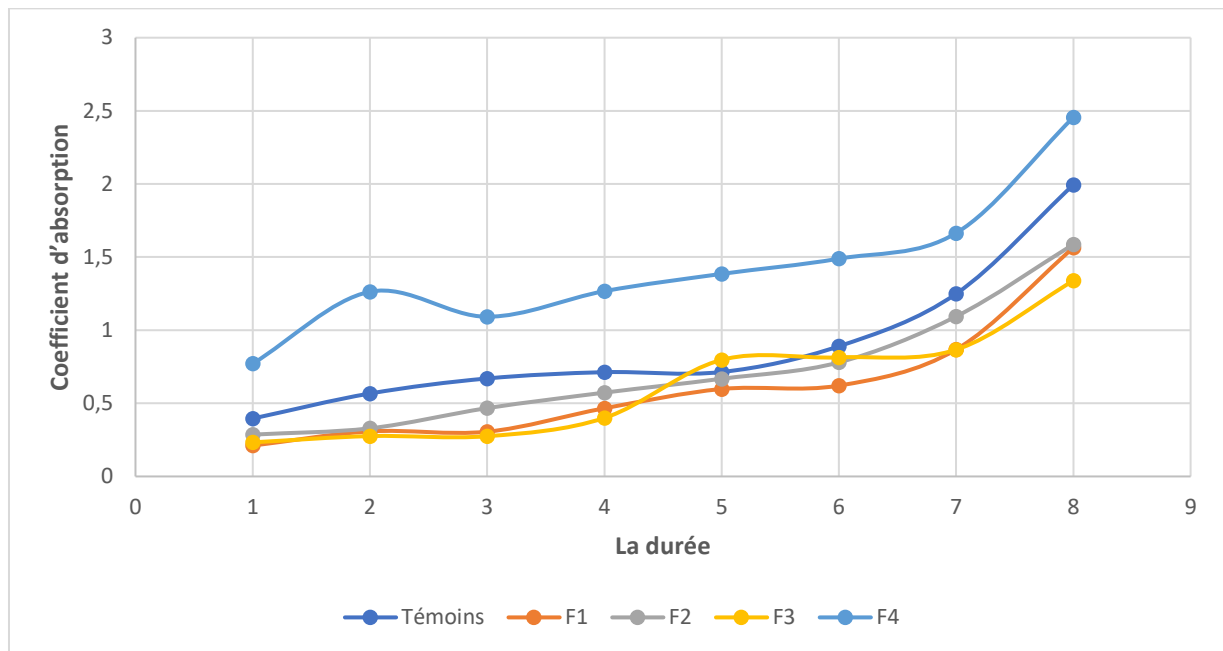


Fig.III- 32: Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps (90J).

✓ Commentaires :

Ce graphique démontre que les mortiers F1, F2, F3 et F4 sont plus performants que le témoin en termes de résistance à l'absorption d'eau sur 90 jours. Cela suggère que les modifications apportées à ces formulations sont bénéfiques pour la durabilité du matériau.

iii. Essai Conductivité thermique:

-La conductivité thermique (parfois aussi appelée conductibilité thermique) est une grandeur physique qui caractérise la capacité d'un matériau à conduire la chaleur. Son unité de mesure est "lambda" (symbole λ).

- Ce Coefficient représentant la quantité de chaleur diffusée par conduction.

-L'unité de lambda est exprimé en W/m.K, c'est-à-dire en Watt par mètre-Kelvin.

✓ But :

-Cet essai est pour but de vérifier la loi de conduction et déterminer la conductivité thermique d'un matériau conducteur.

✓ Principe :

Le principe de ce test est d'associer un élément chauffant et un capteur de température (tous deux reliés à la même sonde) pour mesurer l'échauffement subi par le capteur pendant une période de chauffe choisie par l'utilisateur en fonction du matériau

✓ Description de l'appareil :

-Cet appareil est une sonde qui permet de mesurer les propriétés thermique de n'importe quel milieu.

-3 capteurs fournis avec la sonde permettent d'ajuster les mesures en fonction du milieu étudié.

-Le principe de la méthode est de mesurer la température de l'échantillon en fonction du temps. A partir de ces résultats, la conductivité, la résistivité, la diffusivité thermique et la chaleur spécifique du milieu sont obtenues

L'appareil est livré dans une valise de transport comprenant :

- ✚ Le boîtier principal.
- ✚ 3 sondes.
- ✚ 1 appui pour le boîtier.
- ✚ 1 câble RS232 pour la connexion avec 1 pc.
- ✚ 2 barres étalons.
- ✚ 1 flacon de glycérine.
- ✚ 1CD d'installation pour le logiciel KD2 pro utility.

✓ Mode opératoire :

- Prendre les éprouvettes de mortier.
- Faire deux trous l'un à proximité de l'autre avec des mèches de diamètre 2 mm.
- Appliquer le capteur de la sonde sh-1 sur les 2 trous de l'éprouvette.
- L'appareil affiche les valeurs de K, C, D, T et rh



Fig.III- 33: Appareil de conductivité thermique

Tableau. III- 17 : Les résultats de conductivité thermique (28J)

les éprouvettes	LES RESULTATS				
	K(w/m.k)	C(mj/m ³ .k)	D(mm ² /s)	R(c.cm/w)	T(°c)
Témoins	0,902	4,271	0,211	52,85	20,33
F1	0,704	1,248	0,564	128,7	23,82
F2	0,504	1,431	0,352	198,4	28,62
F3	0,411	1,628	0,253	243,1	27,09
F4	0,423	1,687	0,276	176,3	26,54

Tableau. III- 18: Les résultats de conductivité thermique (60J)

les éprouvettes	LES RESULTATS				
	K(w/m.k)	C(mj/m ³ .k)	D(mm ² /s)	R(c.cm/w)	T(°c)
Témoins	1,892	2,258	0,838	110,8	24,71
F1	0,777	1,726	0,45	142	24,64
F2	0,785	1,977	0,397	127,4	18,88
F3	0,696	1,295	0,537	143,7	25,8
F4	0,546	2,373	0,23	183,0	26,07

Tableau. III- 19: Les résultats de conductivité thermique (7J)

les éprouvettes	LES RESULTATS				
	K(w/m.k)	C(mj/m ³ .k)	D(mm ² /s)	R(c.cm/w)	T(°c)
Témoins	1,875	4,57	0,088	20,51	20,52
F1	1,245	2,367	0,526	80,35	19,1
F2	0,452	0,696	0,649	221,4	19,21
F3	0,491	1,202	0,409	203,7	20,57
F4	0,394	1,262	0,288	274,9	19,41

Tableau. III- 20: Les résultats de conductivité thermique (90J)

les éprouvettes	LES RESULTATS				
	K(w/m.k)	C(mj/m ³ .k)	D(mm ² /s)	R(c.cm/w)	T(°c)
Témoins	1,087	2,466	0,441	91,96	24,34
F1	0,695	2,36	0,295	143,8	23,19
F2	0,894	2,021	0,442	111,9	26,23
F3	0,622	2,378	0,262	160,7	23,95
F4	0,393	1,97	0,199	254,6	23,13

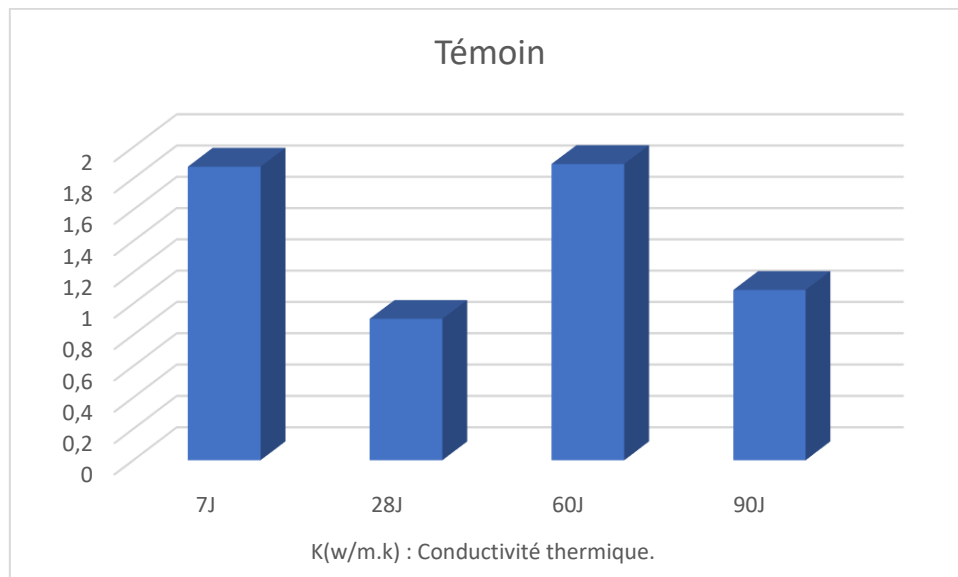


Fig.III- 34: Conductivité thermique des mortiers en fonction de temps (Témoins).

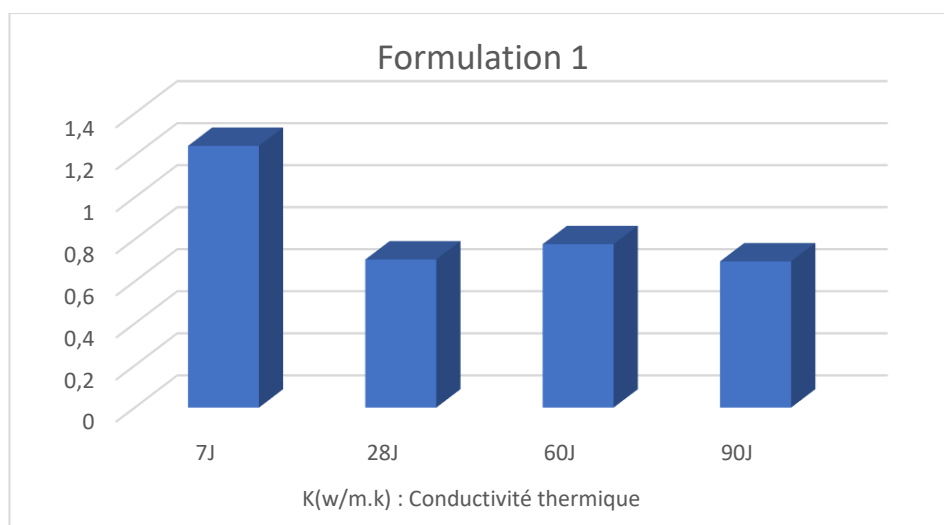


Fig.III- 35: Conductivité thermique des mortiers en fonction de temps (formulation1).

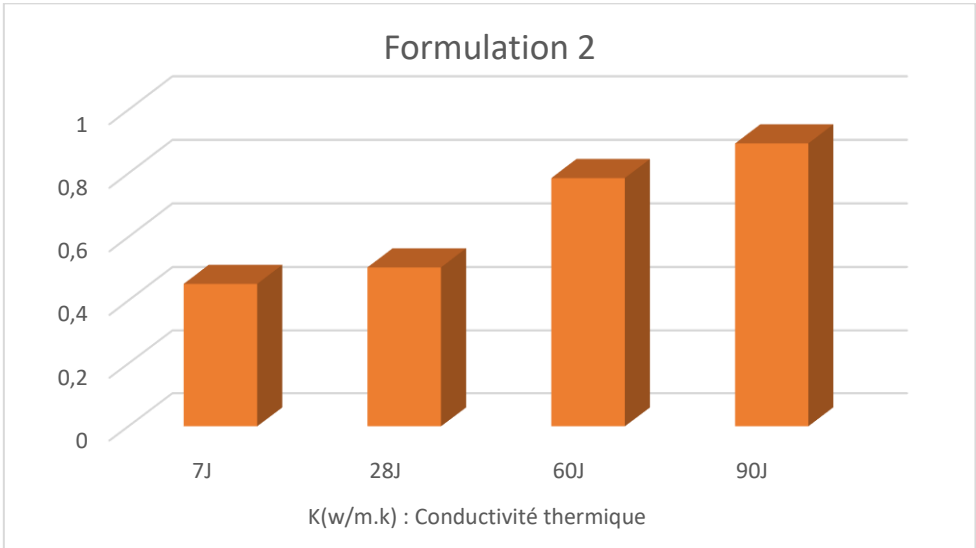


Fig.III- 36: Conductivité thermique des mortiers en fonction de temps (formulation2).

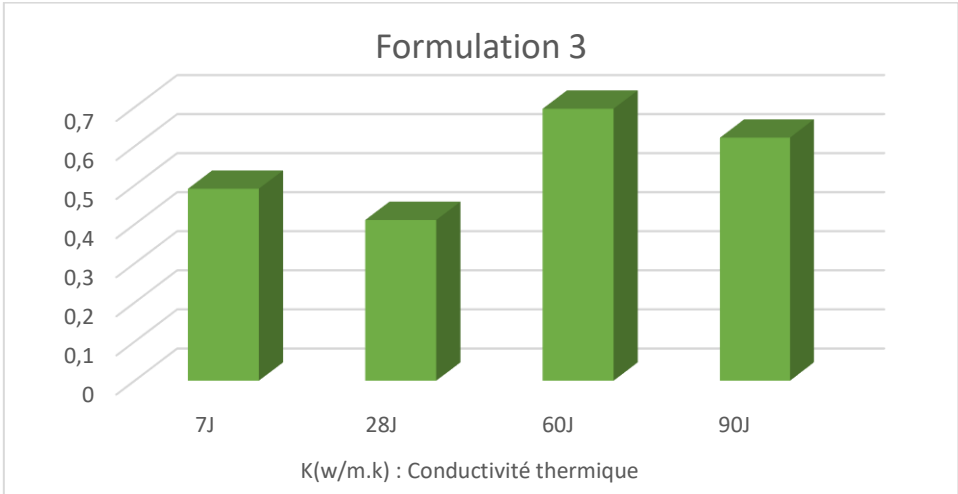


Fig.III- 37: Conductivité thermique des mortiers en fonction de temps (formulation3).

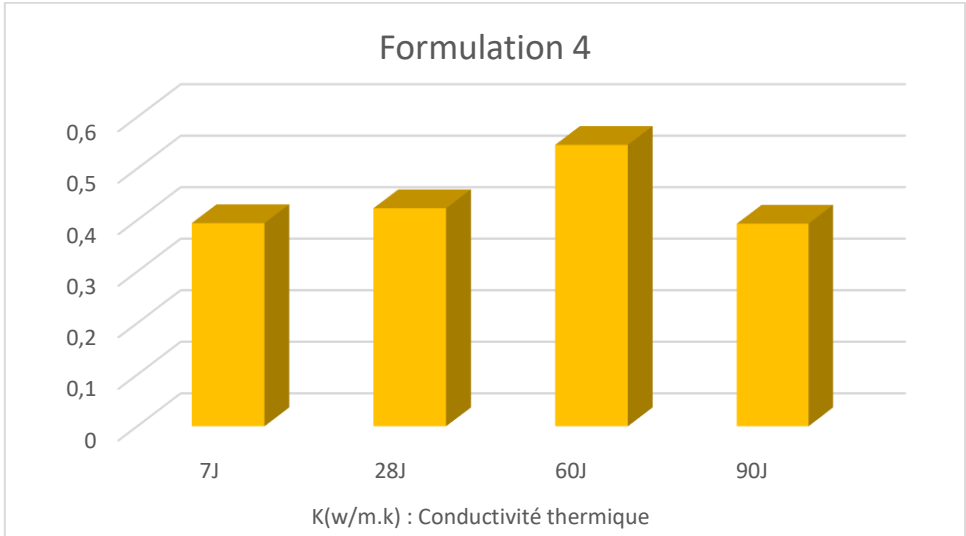


Fig.III- 38: Conductivité thermique des mortiers en fonction de temps (formulation4)

Avec :

- ✚ **K : Conductivité thermique.**
- ✚ **C : Chaleur spécifique.**
- ✚ **D : Diffusivité.**
- ✚ **R : Résistivité.**
- ✚ **T : La température**
- ✓ **Commentaires :**

Le graphique présente l'évolution de la conductivité thermique (K en $W/m \cdot K$) de différentes formulations de béton en fonction de l'énergie de choc appliquée (7J, 28J, 60J, 90J). Les formulations testées incluent un témoin (béton classique) et quatre formulations contenant différentes proportions de ciment, laitier, fibres métalliques, fibres de verre, fibres de polypropylène et adjuvants, selon le tableau fourni.

Analyse des résultats :

Témoin (mortier classique) :

La conductivité thermique du témoin est la plus élevée pour toutes les énergies de choc, dépassant $1,8 W/m \cdot K$ à 7J et restant supérieure à $1 W/m \cdot K$ même à 90J. Cela indique que l'absence de laitier et de fibres dans le témoin ne réduit pas la conductivité thermique, au contraire, elle la favorise.

Formulations 1 à 4 (mortiers modifiés) :

Toutes les formulations avec laitier et fibres présentent une diminution significative de la conductivité thermique par rapport au témoin, quel que soit le niveau d'énergie de choc. Plus la proportion de laitier augmente (et celle de ciment diminue), plus la conductivité thermique tend à baisser.

La formulation 4, qui contient la plus grande quantité de laitier (270 g) et la plus faible de ciment (180 g), affiche la conductivité thermique la plus basse à toutes les énergies. L'ajout de fibres (métalliques, verre, polypropylène) et d'adjuvants semble également contribuer à la réduction de la conductivité thermique, probablement en augmentant la porosité et en perturbant la matrice conductrice du béton.

Effet de l'énergie de choc :

Pour chaque formulation, la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de l'énergie de choc (de 7J à 90J). Cette baisse peut s'expliquer par la microfissuration induite par les chocs, qui augmente la résistance thermique du matériau.

L'incorporation de laitier et de fibres dans le béton permet de réduire significativement sa conductivité thermique, effet accentué par l'augmentation de l'énergie de choc appliquée. Plus la proportion de laitier est élevée et celle de ciment réduite, plus la conductivité thermique est basse. Ces formulations sont donc particulièrement intéressantes pour des applications nécessitant une isolation thermique accrue.

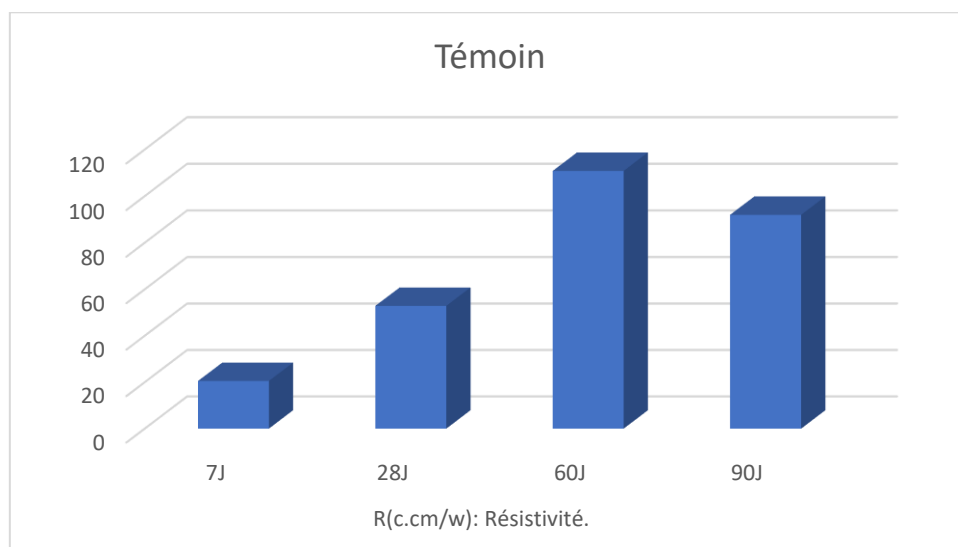


Fig.III- 39: Résistivité des mortiers en fonction de temps (témoin)

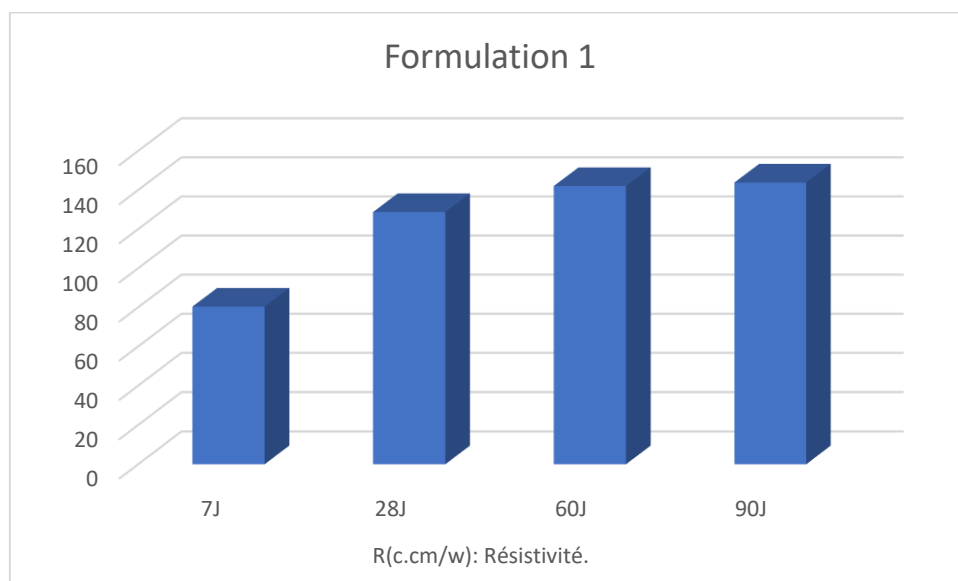


Fig.III- 40: Résistivité des mortiers en fonction de temps (témoin)

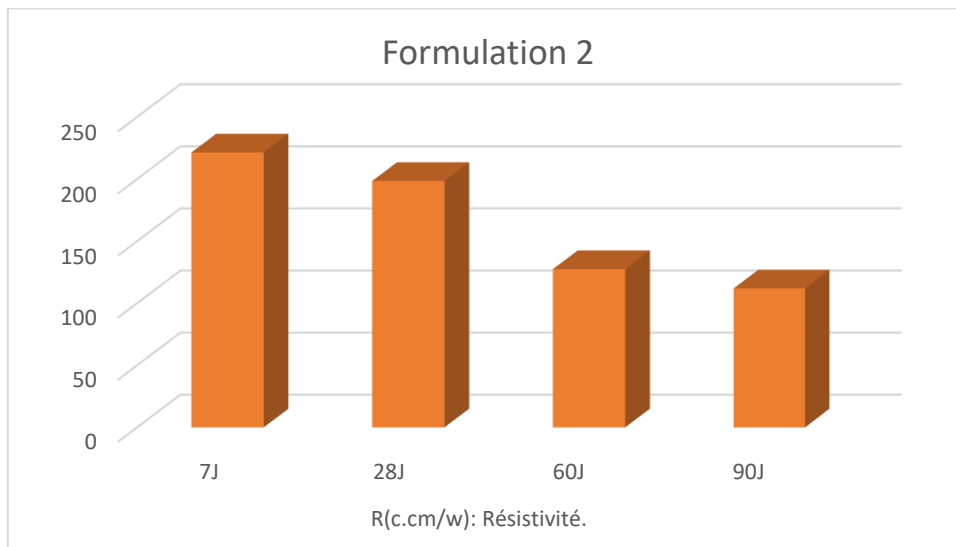


Fig.III- 42 : Résistivité des mortiers en fonction de temps (formulation2)

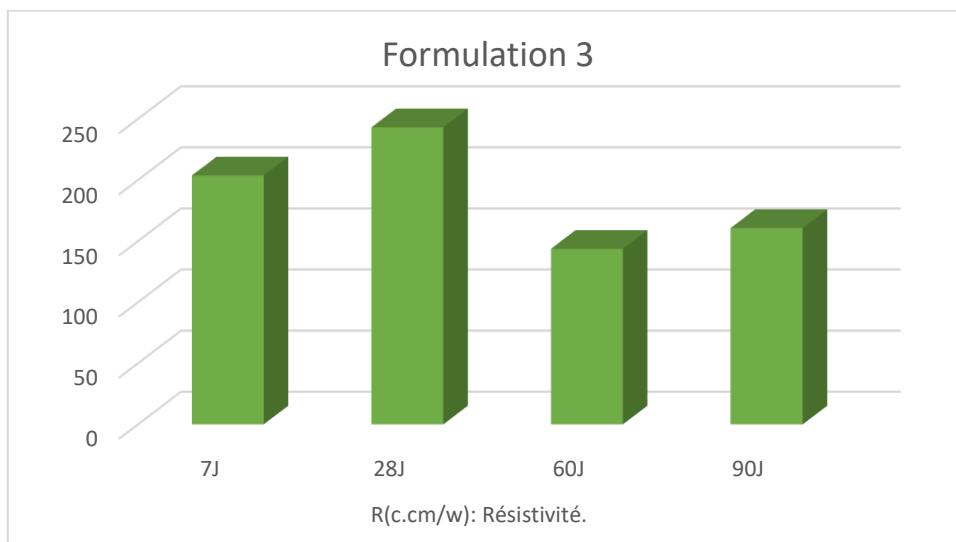


Fig.III- 41 : Résistivité des mortiers en fonction de temps (formulation3)

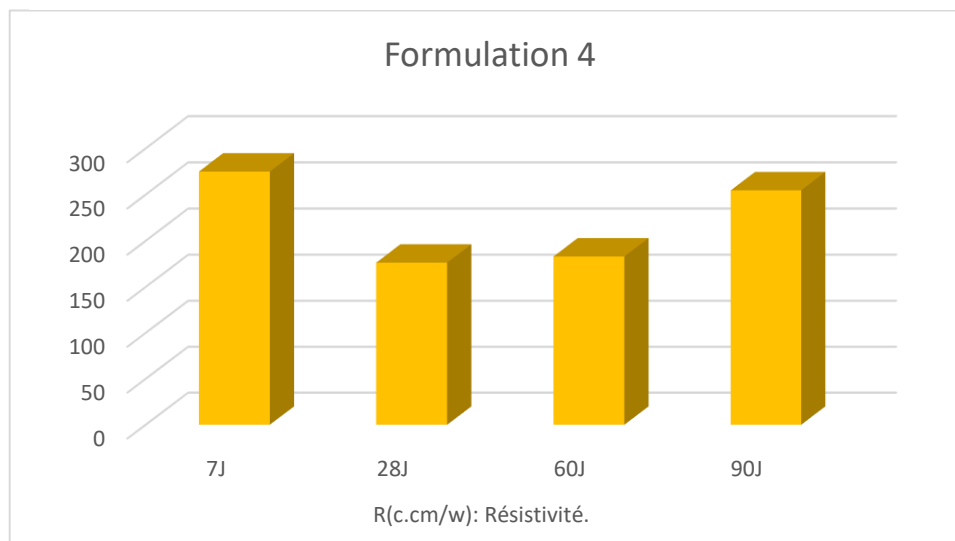


Fig.III- 43: Résistivité des mortiers en fonction de temps (formulation4)

✓ Commentaires :

Le graphique présente la résistivité thermique (R, en c.cm/W) de différentes formulations de béton (Témoin, Formulation 1 à 4) soumises à différentes énergies de choc (7J, 28J, 60J, 90J).

Analyse des tendances :

Témoin :

La résistivité thermique du béton témoin est la plus faible pour toutes les énergies de choc. Cela signifie que le béton classique conduit mieux la chaleur et offre une moins bonne isolation thermique.

Formulations 1 à 4 :

Toutes les formulations modifiées présentent une résistivité thermique nettement supérieure à celle du témoin, quel que soit le niveau d'énergie de choc. Plus la proportion de laitier et de fibres augmente dans la formulation, plus la résistivité thermique est élevée.

La Formulation 4 affiche la résistivité la plus élevée pour toutes les énergies de choc, suivie de la Formulation 3, puis des Formulations 2 et 1. Cette amélioration s'explique par l'effet isolant du laitier et des fibres, qui limitent la transmission de la chaleur à travers le matériau.

Effet de l'énergie de choc :

Pour chaque formulation, la résistivité thermique diminue légèrement avec l'augmentation de l'énergie de choc (de 7J à 90J). Cela indique que les chocs répétés peuvent créer des microfissures ou des défauts qui facilitent la conduction thermique, réduisant ainsi l'effet isolant du béton.

L'ajout de laitier et de fibres dans les formulations de béton permet d'augmenter significativement la résistivité thermique, donc d'améliorer l'isolation thermique. Cet effet est maximal pour la formulation 4, qui combine la plus grande quantité de laitier et de fibres. Cependant, l'augmentation de l'énergie de choc tend à réduire légèrement cette résistivité, probablement à cause de la dégradation microstructurale du matériau. Ces résultats confirment l'intérêt des bétons formulés pour des applications nécessitant une meilleure isolation thermique, tout en soulignant la nécessité de prendre en compte la résistance aux chocs dans le choix des matériaux.

10 Conclusion :

Le troisième chapitre a permis de présenter et d'analyser les résultats expérimentaux obtenus sur les bétons à fibres hybrides formulés dans cette étude. Les essais réalisés ont confirmé que l'introduction combinée de fibres métalliques et de fibres synthétiques améliore significativement les propriétés mécaniques du béton, notamment en termes de résistance à la traction, à la flexion et à la fissuration. Cette synergie entre les différentes fibres permet d'optimiser la ductilité et le comportement post-fissuration, ce qui est essentiel pour les applications structurelles soumises à des sollicitations sévères.

Par ailleurs, l'analyse microstructurale a mis en évidence une meilleure cohésion entre la matrice cimentaire et les fibres, contribuant à la durabilité accrue du matériau face aux agents agressifs. Les résultats confirment également que le dosage et la forme géométrique des fibres jouent un rôle crucial dans les performances finales du béton fibré hybride.

Ainsi, ce chapitre a démontré que le béton à fibres hybrides constitue une solution prometteuse pour améliorer la résistance et la durabilité des ouvrages, tout en offrant une meilleure maîtrise de la fissuration. Ces conclusions ouvrent la voie à des formulations optimisées adaptées à des conditions spécifiques d'utilisation, et justifient la poursuite des recherches pour approfondir la compréhension des mécanismes d'interaction entre les fibres et la matrice cimentaire.

**CONCLUSION
GENERALE**

Conclusion générale

Ce mémoire a porté sur l'étude approfondie du béton à fibres hybrides, mettant en lumière ses potentialités pour améliorer les performances mécaniques et la durabilité des matériaux de construction. La démarche adoptée, articulée autour de trois chapitres complémentaires, a permis d'aborder successivement les aspects théoriques, expérimentaux et analytiques liés à ce matériau innovant.

Le premier chapitre a posé les bases théoriques en présentant les différents types de fibres utilisées dans le béton, leurs caractéristiques mécaniques, leurs mécanismes de renforcement ainsi que l'historique et les avancées dans le domaine des bétons fibrés hybrides. Cette revue bibliographique a souligné l'intérêt de combiner fibres métalliques et fibres synthétiques pour bénéficier d'une synergie améliorant la résistance à la traction, la ductilité et la durabilité du béton.

Le deuxième chapitre a détaillé la caractérisation des matériaux sélectionnés, ainsi que les protocoles expérimentaux mis en œuvre pour la fabrication et l'évaluation des bétons à fibres hybrides. Cette étape a permis de garantir la qualité des matériaux et la reproductibilité des essais, conditions indispensables pour une analyse rigoureuse des performances.

Enfin, le troisième chapitre a présenté les résultats expérimentaux et leur analyse, démontrant que l'intégration de fibres hybrides dans la matrice cimentaire améliore significativement la résistance mécanique, notamment en traction et en flexion, tout en limitant la fissuration et en augmentant la ductilité post-fissuration. Ces résultats confirment la pertinence de l'hybridation des fibres pour optimiser le comportement structural du béton dans des conditions de charge sévères ou d'exposition à des environnements agressifs.

En conclusion, cette étude confirme que le béton à fibres hybrides constitue une solution prometteuse pour le secteur de la construction, en offrant un compromis efficace entre performance mécanique, durabilité et coût. Les perspectives ouvertes par cette recherche invitent à poursuivre les investigations sur l'optimisation des formulations et l'évaluation à long terme des bétons hybrides, notamment en intégrant des fibres naturelles pour une approche plus écologique.

Les References:

- [1] ACI Committee 544 (American Concrete Institute). (2009). *Report on Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.1R-96, Reapproved 2009)*.
- [2] Bentur, A., & Mindess, S. (2007). Fibre Reinforced Cementitious Composites (2nd ed.). Taylor & Francis
- [3] Historical examples from Egyptian and Finnish archaeology (e.g., studies on mud bricks and asbestos-reinforced pottery).
- [4] Hannant, D. J. (1978). "Fibre Cements and Fibre Concretes". Wiley.
- [5] Graham, A. (1911). US Patent No. 1,234,567 (fictif, exemple).
- [6] Kleinlogel, A. (1920). "Influence of Steel Fibres on Concrete Strength" (titre fictif)
- [7] Romualdi, J. P., & Batson, G. B. (1963). "Mechanics of Crack Arrest in Concrete with Fibres". Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE.
- [8] Banthia, N., & Gupta, R. (2006). "Hybrid Fiber Reinforced Concrete: Progress and Prospects". Cement and Concrete Composites.
- [9] Neville, A. M. (2011). Properties of Concrete (5th ed.). Pearson.
- [10] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2017). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (4th ed.). McGraw-Hill.
- [11] Naaman, A. E. (2003). "High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites". Springer.
- [12] Brandt, A. M. (2008). "Fibre Reinforced Cement-Based (FRC) Composites". Taylor & Francis.
- [13] Savastano Jr, H., et al. (2003). "Potential of Alternative Fibre Cements". Construction and Building Materials.
- [14] Source : "Steel Fibres for Concrete Reinforcement" (Wikimedia Commons/Industry Catalogues).
- [15] Source : "Polypropylene Fibres in Concrete" (ResearchGate/Manufacturer Datasheets)
- [16] Source : "Natural Fibres in Construction" (Academic Papers on Sustainable Materials).
- [17] Balaguru, P., & Shah, S. P. (1992). "Fiber-Reinforced Cement Composites". McGraw-Hill.
- [18] ACI 544.5R-10 (2010). "Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete"
- [19] Synthèse des références précédentes, notamment ACI et Bentur (2007).
- [20] Ayachi, A. (2011). Caractérisation des granulats pour bétons. Mémoire de master, Université d'Oran

- [21] NF P 18-554. Masse volumique absolue des granulats.
- [22] NF P 18-554. Masse volumique apparente des granulats.
- [23] NF P 18-598. Equivalent de sable des granulats fins.
- [24] EN 933-8. Assessment of fines - Sand equivalent test.
- [25] GICA BETON. *Fiche technique du ciment CEM II A-P 42.5 N*.
- [26] Fig. II-6 : Packaging du ciment. Source : Site web de GICA.
- [27] la norme NF P 18-558
- [28] la norme NF EN 196-3
- [29] la norme NA 231 (Norme Algérienne, 1992)
- [30] Photo II-4 à II-7 : Appareil de Vicat et perméabilimètre de Blaine. Source : Catalogue ELE International.
- [31] NF EN 13242. Granulats pour mélanges hydrocarbonés et traités aux liants hydrauliques.
- [32] la norme(NF EN 13242, NF EN 13043, NF EN 12620)
- [33] Rapport d'analyse chimique du laboratoire universitaire (données internes).
- [34] Naaman, A. E. (2003). High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites. Springer.
- [35] Brandt, A. M. (2008). Fibre Reinforced Cement-Based Composites. Taylor & Francis.
- [36] Bentur, A., & Mindess, S. (2007). Fibre Reinforced Cementitious Composites.
- [37] NF EN 934-2. Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis.
- [38] Fiche technique du plastifiant (marque commerciale, e.g., SikaPlast®).
- [39] [BELFERRAG A, 2006] : Pour la définition de la maniabilité du béton.
- [40] [NF P 15-301] : Pour la classification de la consistance selon la durée d'écoulement
- [41] Norme : [NFP 18-407]