

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOUCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ -BOUIRA
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES

Département de Génie Civil



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
EN VUE L'OBTENTION DU DIPLOME MASTER

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Structure

Présenté par :

REZKALLAHI NESRINE

AOUF YOUSRA

Thème :

**RENFORCEMENT DES ÉLÉMENTS STRUCTURAUX A BASE DE RÉSINE
CHARGÉE PAR DE FIBRES.**

Devant le jury composé de :

Mr. LAIB Billal	MCA	UAMOB	Président
Mr. MOKEDDEM Youssef	MCB	UAMOB	Encadrant
Mr. AIT TAHAR Kamal	PR	UAMOB	Co-encadrant
Mr. BOUAMRA Youcef	MCA	UAMOB	Examineur
Mr. HAMI Brahim	MCA	UAMOB	Examineur
Mme. AIT ALI Salima	MCA	UAMOB	Invitée

Année Universitaire : 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Louange à Allah, lui qui nous a guidé, soutenu et accordé la force de persévérer malgré la fatigue. C'est par sa grâce que nous avons pu mener à bien ce travail, et c'est à lui que revient notre reconnaissance éternelle.

Nous exprimons nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à notre encadrant, le Dr MOKEDDEM YOUSSEF, pour ses précieux conseils, son accompagnement constant et les informations riches qu'il nous a fourni, ayant grandement contribué à l'aboutissement de notre étude sous tous ses aspects.

Nous remercions également les membres de jury de soutenance qui ont bien voulu lire et évaluer notre travail.

Nos remerciements vont aussi à toutes les personnes qui nous ont soutenues pour mener à terme ce projet, en particulier : Pr AIT TAHAR KAMAL, Pr AIT ALI SALIMA, Dr YUCEF BOUAMRA, SAADI HADJER, sans oublier l'ensemble des membres de laboratoire génie civil de l'Université de Bouira et de Boumerdes.

Enfin, un grand merci à toutes les personnes qui nous ont tendu la main et apporté leur aide tout en long de ce parcours.

Dédicace

Alhamdoulillah, qui m'a accordé la force, la patience et la sagesse nécessaires pour accomplir ce travail.

Un long chemin fait d'échecs et de réussites. Fier de notre combat pour réaliser nos rêves.

Un moment que j'ai toujours attendu et rêvé dans une histoire dont les chapitres sont terminés.

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurais point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

À mon cher père que dieu le protège.

À celui qui m'a donné tout ce qu'il a pour réaliser ses espoirs, à celui qui me pousse toujours à atteindre ce que je veux.

À mes sœurs et à mon frère. Mon soutien dans la vie. À tous les membres de ma famille et à tous mes amis sans exception.

À tous les honorables professeurs qui nous ont donné un coup de main. C'est à eux que je dédie ce travail qu'Allah m'aide et vous aide à faire le bien.

REZKALLAHI NESRINE

Dédicace

Avant tout, je rends grâce à Allah, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la patience et le courage nécessaires à l'accomplissement de ce modeste travail.

Je dédie ce mémoire :

À mon cher père, KAMEL,

Tu as toujours été pour moi un modèle d'intégrité, de rigueur et de sagesse. C'est grâce à toi que j'ai compris la valeur du travail et le sens des responsabilités. Ton amour inconditionnel, ta générosité et ton soutien constant ont été pour moi une source de lumière et de motivation tout au long de mon parcours. Aucun mot ne saurait exprimer pleinement l'admiration, le respect et l'amour que je te porte. Ce travail est le fruit de tous tes sacrifices et de ton engagement pour mon éducation. Que Dieu te comble de santé, de bonheur et d'une longue vie. Je t'aime, papa.

À ma chère mère, HAMIDA,

Merci d'avoir toujours cru en moi, même dans les moments les plus difficiles. Ton amour, ta tendresse et ta foi inébranlable en mes capacités ont été des piliers essentiels dans ma vie. Tu es ma lumière, et ta présence continue d'illuminer mon chemin.

À ma petite sœur adorée, HADYL,

Ta présence pleine de douceur et de spontanéité m'a toujours apporté du réconfort. Ton énergie positive, ton soutien discret mais constant, et ton amour fraternel sont pour moi une richesse inestimable.

À mes chers frères, RIYAD et KIKI,

Vous avez été les témoins fidèles de mes hauts et de mes bas, partageant mes joies comme mes épreuves. Votre soutien moral et vos encouragements permanents m'ont donné la force d'avancer. Merci d'avoir été là, tout simplement.

Enfin, Je dis merci à l'homme de ma vie, mon future mari TAREK de m'avoir aidé et soutenue pendant toute cette période.

AOUF YOUSRA

Résumé

Dans le domaine de génie civil, les éléments structuraux en béton, comme la poutre, la dalle, et la plateforme, jouent un rôle primordial dans les constructions de génie civil. Cependant, malgré leur robustesse apparente, elles sont souvent susceptibles à un phénomène récurrent et préoccupant telle que la fissuration. Cette dernière, qu'elle soit profonde ou superficielle, elle peut compromettre le fonctionnement des structures, et sa durabilité.

A cet effet, le traitement des fissures reste une opération primordiale et sensible. Tandis que, le mauvais traitement de la fissuration, peut permet son évolution, entraînant la dégradation du béton, amenant à la corrosion des aciers et en conséquence, une perte de la capacité portante de la construction.

Afin de remédier à ce problème, une solution adoptée consiste à élaborer une résine chargée qui permet de traiter les fissures et renforcer les éléments de structure. La résine utilisée est de type résine époxy, et le renforcement est fait soit par des fibres de poil de chameau soit par de fibres de verre. Cette méthode permet de viser en même temps une performance mécanique optimale et un développement durable.

Une étude expérimentale et numérique sur des éprouvettes en résine chargée et sur des poutres en béton renforcées par de la résine chargée est réalisée. Différents paramètres à savoir le type de fibre, sa longueur et sont pourcentage d'occupations par rapport à la résine ont été variés, afin de caractériser le comportement mécanique du composite.

Mots-clés : Résine chargée, Résine époxy, Fibres de poil de chameau, Fibres de verre, Comportement mécanique.

Abstract

Concrete structural elements, such as beams, slabs, and platforms, play a key role in civil engineering constructions. However, despite their apparent robustness, they are often susceptible to a recurring and concerning phenomenon such as cracking. The latter, whether deep or superficial, can compromise the functionality of structures, and their durability.

To this end, the treatment of cracks remains a primordial and sensitive operation. Whereas, the poor treatment of cracking can allow its evolution, leading to concrete degradation, lead to the corrosion of steel and consequently, a loss of the bearing capacity of the structure.

In order to remedy this problem, a solution adopted is to develop a charged resin that allows these cracks to be treated and the structural elements to be reinforced. The resin used is of epoxy type, and the reinforcement is made by camel hair fibers as a first variant, and by glass fibers. This method makes it possible to aim at the same time for optimal mechanical performance and sustainable development.

In this context, an experimental and numerical study on loaded resin specimens and on concrete beams reinforced with loaded resin was conducted. Indeed, we varied different parameters namely the type of fiber, its length and are percentage of occupations compared to the resin, in order to characterize the mechanical behavior of the composite.

Keywords: Loaded resin, Epoxy resin, Camel hair fibers, Glass fibers, Mechanical behavior.

ملخص

تلعب العناصر الهيكلية الخرسانية، مثل العوارض والألواح والمنصات، دورًا رئيسيًا في إنشاءات الهندسة المدنية. ومع ذلك، وعلى الرغم من قوتها الظاهرة، فإنها غالبًا ما تكون عرضة لظاهرة متكررة ومثيرة للقلق مثل التشقق. وهذا الأخير، سواء كان عميقًا أو سطحيًا، يمكن أن يضر بوظيفة الهياكل ومتانتها.

ولتحقيق هذه الغاية، تظل معالجة الشقوق عملية أساسية وحساسة. في حين أن المعالجة السيئة للتشققات يمكن أن تسمح بتطوره، مما يؤدي إلى تدهور الخرسانة، ويؤدي إلى تآكل التعزيزات وبالتالي فقدان قدرة تحمل الهيكل.

ولمعالجة هذه المشكلة، تم اعتماد حل يتمثل في تطوير راتينج مشحون يسمح بمعالجة هذه الشقوق وتعزيز العناصر الهيكلية. الراتنج المستخدم هو من نوع الإيبوكسي، ويتم التعزيز باستخدام ألياف شعر الإبل كنوع أول، والألياف الزجاجية. تتيح هذه الطريقة إمكانية السعي في نفس الوقت إلى تحقيق الأداء الميكانيكي الأمثل والتنمية المستدامة.

وفي هذا السياق، قمنا بدراسة تجريبية وعددية على عينات الراتنج المحملة وعلى العتبات الخرسانية المسلحة بالراتنج المحمل. وبالفعل، قمنا بتنوع المعايير المختلفة وهي نوع الألياف وطولها ونسبتها مقارنة بالراتنج، من أجل تحديد السلوك الميكانيكي للمركب.

الكلمات المفتاحية: الصمغ المحمل، الصمغ الإيبوكسي، ألياف شعر الإبل، ألياف الزجاج، السلوك الميكانيكي.

SOMMAIRE

Liste des tableaux	XI
Liste des figures	XIII
Introduction générale :	XVI

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I-1) Introduction :	1
I-2) Généralités :	1
I-3) Histoire de la résine :	2
I-3) Mécanisme de dégradation des éléments structuraux :	2
I-3-1) Corrosion :	2
I-3-2) Fatigue :	3
I-3-3) Usure et abrasion :	3
I-3-4) Détérioration chimique	3
I-3-5) Effets environnementaux	3
I-3-6) Détérioration biologique	3
I-3-7) Détérioration thermique	3
I-4) Les matériaux composites :	4
I-4-1) Éléments constitutifs :	4
I-5) Résine :	4
I-5-1) Type de résine :	5
I-5-1-a) Résines thermoplastiques :	5
I-5-1-b) Résines thermodurcissables :	5
A) Résine époxy :	5
A-1) Les caractéristiques de la résine époxy :	6
A-2) Domaine d'application :	6
B) Résine polyuréthane :	7
B-1) Les caractéristiques de la résine polyuréthane :	7
B-2) Domaine d'application :	7
C) Résine Vinyle :	7
C-1) Les caractéristiques de la résine Vinyle :	8

B-2) Domaine d'application :	8
D) Résine Acrylique :	8
D-1) Les caractéristiques de la résine Acrylique :	8
D-2) Domaine d'application :	8
E) Résine Polyester :	9
E-1) Les caractéristiques de la résine Polyester :	9
E-2) Domaine d'application :	9
E-1)) Les caractéristiques de la résine Polyester :	9
E-2) Domaine d'application :	9
I-6) Fibre :	10
I-6-1) Formes commerciales des renforts :	10
I-6-2) Principaux types de fibres :	10
I-6-2-1) Fibre de verre :	10
I-6-2-2) Fibre de carbone :	11
I-6-2-3) Fibre de poil de chameau :	12
I-6-2-4) Fibre de Polyéthylène :	14
I-6-2-5) Fibre de polypropylène :	15
I-7) Le béton :	16
I-7-1) Les constituants du béton :	16
I-7-1-1) Le ciment :	16
I-7-1-2) L'eau :	16
I-7-1-3) Les granulats :	17
I-7-1-4) Les adjuvants :	17
I-7-2) Comportement mécanique du béton :	18
I-7-2-1) Le béton en compression :	18
I-7-2-2) Le béton en traction :	19
I-8) Conclusion :	19

CHAPITRE II : METHODE EXPERIMENTALE

II-1) Introduction :	22
II-2) Fabrication des éprouvettes en béton :	23
▪ Les matériaux utilisés :	23
A) Ciment :	23
B) Sable :	24

C) Gravieres :	24
D) L'eau de gâchage :	24
E) Adjuvant :	25
II-2-1) Essais d'identifications et caractérisation de béton :	26
II-2-1-a) Analyse granulométrique :	26
II-2-1-b) La masse volumique :	28
b-1) La masse volumique apparente	28
b-2) La masse volumique absolue :	30
II-2-1-c) Essai d'équivalent de sable (NF P18-598) :	31
II-2-1-d) Essai de la consistance :	32
II-2-1-e) Essai de prise :	34
II-2-2) Formulation de béton :	36
II-2-2-1) Essai sur le béton frais :	38
II-2-2-2) Confection des éprouvettes :	39
II-3) Fabrication des éprouvettes en résine renforcée par des fibres :	40
II-3-1) Préparation des fibres :	40
II-3-1-a) Fibre de mat de verre (fibre de verre E) :	41
II-3-1-b) Fibre de poil de chameau :	43
II-3-2) Préparation de la résine :	44
II-3-2-a) Identification :	44
II-3-3) Élaboration des éprouvettes en résine renforcée par des fibres :	45
II-3-3-a) Mode opératoire :	45
II-4) Préparation du montage :couple éprouvette en béton-plaque :	49
II-4-1) Préparation des éprouvettes en béton :	50
II-4-2) Préparation de type de résine :	50
II-4-3) Application de mélange sur l'éprouvettes en béton :	51
II-5) Techniques de caractérisation :	52
II-5-1) Propriétés mécaniques de résine :	52
II-5-1-a) Essai de traction :	52
II-5-2) Propriétés mécaniques de béton :	53
II-5-2-a) Essai de compression :	53
II-5-2-b) Essai de traction par flexion :la norme (12390-5).....	54
II-6) La conclusion :	55

CHAPITRE III: RÉSULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

III-1) Introduction :	57
III-2) Analyse expérimentale du comportement mécanique des matériaux soumis à des efforts de traction :	57
III-2-1) Résultats d'essai de traction :	58
III-2-2) Comportement de l'éprouvette en résine renforcée :	58
III-2-2-a) comportement de la résine renforcée par la fibre de verre :	59
III-2-2-b) Comportement de la résine renforcée par de poil de chameau :	61
III-2-3) La contrainte maximale atteinte pour chaque type de résine renforcée :	64
III-3) effet de la longueur et pourcentage des fibres sur la résistance de la résine :	65
III-3-1) Effet longueur / pourcentage sur la résistance de la résine renforcée avec des fibres de verre :	65
III-3-1-a) Effet de la longueur sur la résistance de la résine renforcée avec des fibres de verre :	65
III-3-1-b) Effet de pourcentage sur la résistance :	66
III-3-2) Effet longueur / pourcentage sur la résistance de la résine renforcée avec des fibres poil de chameau :	67
III-3-2-a) Effet de la longueur sur la résistance	67
III-3-2-b) Effet de pourcentage sur la résistance :	68
III-4) Confrontation des dimensions maximales :	69
III-5) Confrontation des pourcentages maximum :	69
III-6) Essai sur les éprouvettes en béton :	70
III-6-1) Résultats d'essai de compression sur les éprouvettes 16 ϕ 32 cm :	70
III-6-2) Résultats d'essai de traction par flexion sur les éprouvettes 7 \times 7 \times 28cm :	70
III-6-2-2) La force maximale appliquée :	71
III-6-2-3) La contrainte maximale pour chaque éprouvette :	72
III-7) Conclusion :	72

CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE

IV-1) Introduction :	73
IV-2) Présentation succincte du logiciel Abaqus :	73
IV-3) Un modèle pour le béton :	74
IV-4) Relation contrainte-déformation.....	74
IV-5) Loi d'écrouissage	75
VI- 6) Modèle élastique-orthotrope pour les composites	77

VI-7) Présentation des modèles :	77
IV-8) Présentation des résultats et discussion	78
IV-8-1) Poutre de référence P-Ref	79
IV-8-2) Poutre renforcée : Cas de 6.2cm :	79
IV-8-3) Poutre renforcée : Cas de 12.4cm	82
IV-8-4) Poutre renforcée : Cas de 18.6cm	84
IV-9) Confrontation des résultats	87
IV-10) Conclusion :	88
Conclusion générale	90

Liste des tableaux

Tableau II 1 : Les propriétés chimiques de ciment	24
Tableau II 2 : Les analyses chimiques de l'eau	25
Tableau II 3 : Analyse granulométrique	27
Tableau II 4 : Résultats de l'essai de la masse volumique apparent	30
Tableau II 5 : Les propriétés chimiques de ciment	31
Tableau II 6 : Résultats de l'essai équivalent de sable	32
Tableau II 7 : les résultats d'essai d'enfoncement de la sonde de l'appareil Vicat	33
Tableau II 8 : Tableaux des résultats résumables	33
Tableau II 9 : Les résultats de l'essai de début de prise de deux échantillons	34
Tableau II 10 : Quelques paramètres de calcul	36
Tableau II 11 : Les quantités des matériaux	37
Tableau II 12 : Classe d'affaissement	39
Tableau II 13 : Le volume de béton préparé pour réaliser les éprouvettes	40
Tableau II 14 : Les caractéristiques de la fibre de verre E	41
Tableau II 15 : Les compositions chimiques des fibres de verre	42
Tableau II 16: Les dimensions de la fibre de verre	43
Tableau II 17: Les dimensions des éprouvettes de traction	46
Tableau II 18 : Différente variante et leur identification	48

Tableau III 1: résultats des essais de traction sur les éprouvettes de résine renforcés et non renforcés	58
Tableau III 2 : Résultats d’essai de compression.....	78
Tableau III 3 : Résultats d’essai de traction par flexion.....	78

Liste des figures

Figure I 1: Composition d'un matériau composite. (2)	4
Figure I 2: Les éléments constituant d'un matériau composite (2)	4
Figure I 3: Morphologie et structure des fibres de verre.	11
Figure I 4: Morphologie et structures des fibres de carbone utilisées dans les composites.	12
Figure I 5: Morphologie et structure des fibres de poil de chameau utilisées comme renfort naturel dans les matériaux composites.	13
Figure I 6: Morphologie et structure dans les fibres de Polyéthylène utilisées dans les composites.	14
Figure I 7: Morphologie et structure des fibres de Polypropylène utilisées dans les composites.	15
Figure I 8: Les différents constituants du béton.	16
Figure I 9: Loi de comportement du béton en compression sous chargement statique (23)...	18
Figure I 10: Évolution de la résistance à la traction f_{tj}	19
Figure II 1 : Ciment portland composé CEM/A-L 42.5 R	23
Figure II 2 : Superplastifiant.	26
Figure II 3 : La courbe granulométrique.	28
Figure II 4 : La masse volumique apparent de gravier 3/8.....	29
Figure II 5 : La masse volumique absolue de sable fin.	30
Figure II 6 : L'équivalent de sable.	31
Figure II 7 : L'essai de consistance.	32
Figure II 8 : Courbe représentant la dimension en fonction de rapport E/C.	33
Figure II 9 : Résultats de début de prise.	34
Figure II 10 : Présentation graphique des résultats de l'essai de début de prise.....	35
Figure II 11 : Essai de fin de prise.	35
Figure II 12 : Le cone d'Abrams.	38
Figure II 13 : Résultats de l'essai de l'affaissement.	39
Figure II 14 : Fibres de mat de verre.	41
Figure II 15: Fibres de poil de chameau.....	43
Figure II 16: Caractéristiques de la fibre de poil chameau [26].....	44
Figure II 17 : Durcisseur de la résine.	45
Figure II 18 : Résine époxy.	45
Figure II 19: Dimension des éprouvettes de traction 527-2.	46
Figure II 20 : Moule des éprouvettes de forme ban dog.	47

Figure II 21:Exemple des éprouvettes de résine renforcée.	48
Figure II 22: Préparation du montage couple éprouvette en béton – plaque renforcée en résine.	49
Figure II 23:Les éprouvettes fissurées.	50
Figure II 24:Eprouvette de béton et résine (à l'état frais).	51
Figure II 25 : Éprouvettes de béton et résine (à états durci)	51
Figure II 26 : Essai de traction sur l'éprouvette en résine renforcée.....	52
Figure II 27 : Essai de compression sur éprouvette de béton durci 16 ϕ 32cm.....	53
Figure II 28: Essai de flexion 3 points sur une éprouvette 7 \times 7 \times 28.	54
Figure III 1: Éprouvettes en résine renforcée soumises à des efforts de traction.....	58
Figure III 2: Comportement de la résine renforcée par des fibres de.....	59
Figure III 3: Comportement de la résine renforcée par des fibres	60
Figure III 4: Résistance à la traction des différents types de résine renforcée par des fibres de poil de chameau de (0,5cm)	61
Figure III 5: Résistance à la traction des différents types de résine renforcée par des fibres poil de chameau de (1cm).....	63
Figure III 6: Contraintes maximales pour chaque type de résine.....	64
Figure III 7: Effet de la longueur sur la résistance : cas du renfort en fibres de verre.....	65
Figure III 8: Effet de pourcentage sur la résistance : cas de renfort en fibres de verre.....	66
Figure III 9: Effet de la longueur sur la résistance :cas de renfort en fibres de poil de chameau.	67
Figure III 10: Effet de pourcentage sur la résistance : cas de renfort en de fibres de poil de chameau.....	68
Figure III 11: Confrontation selon les différentes longueurs.	69
Figure III 12: Confrontation selon les différents pourcentages.....	69
Figure III 13 : les forces appliquées sur les éprouvettes.	71
Figure III 14 : La contrainte maximale.	72
Figure IV 1 : Éléments finis utilisés pour la discrétisation des formes complexes.	74
Figure IV 2 : Écrouissage isotrope.	75
Figure IV 3: Réponse du modèle à la compression simple.	76
Figure IV 4: Poutre renforcée.....	78
Figure IV 5: Mode de chargement de la Poutre.	78
Figure IV 6 : Courbe Force – déplacement de la poutre de référence P-Ref.	79

Figure IV 7 : Mode de chargement de la poutre renforcée par une plaque de 6,2 cm de longueur.....	79
Figure IV 8 : Courbe Force – déplacement de la poutre avec plaque composite $L_p = 6,2$ cm .	80
Figure IV 9: Évolution des contraintes dans la variante 1 $e = 6.2$ cm.	80
Figure IV 10 : Évolution de l'endommagement dans la poutre.	80
Figure IV 11 : Évolution des fissures.	81
Figure IV 12 : Mode de chargement de la Poutre renforcée par	82
Figure IV 13: Courbe Force – déplacement de la poutre avec plaque composite.....	82
Figure IV 14 : Évolution des contraintes dans les variantes 2 $e = 12.4$ cm.	83
Figure IV 15 : Évolution de l'endommagement dans la poutre.	83
Figure IV 16 : Évolution de la fissuration dans la poutre.	83
Figure IV 17 : Mode de chargement de la Poutre renforcée par une plaque de 18,6 cm de longueur.....	84
Figure IV 18 : Courbe Force – déplacement de la poutre avec plaque composite.....	85
Figure IV 19: Évolution des contraintes dans la variantes 1 $e = 18.6$ cm.....	85
Figure IV 20 : Évolution de l'endommagement dans la poutre.	85
Figure IV 21 : Évolution de la fissuration dans la poutre.	86
Figure IV 22 : Valeurs de la charge de rupture des poutres.	87
Figure IV 23 : Confrontation des courbes Force de rupture- déplacement des poutres.....	88

Introduction générale

Bien que le béton possède de meilleures propriétés mécaniques en compression, sa résistance faible à la traction le rend sensible à l'apparition de fissures microscopique et macroscopique et à la dégradation au cours du temps. De plus, les exigences en matière de la sécurité, de la performance structurelle ainsi que d'optimisation des coûts d'entretien incitent à rechercher des solutions techniques de renforcement plus performantes, allégées et durables.

Dans ce contexte, les matériaux composites, particulièrement ceux constitués de fibres en poils de chameau ou de fibres de verre, se classent comme des solutions innovantes et efficaces dans ce domaine de renforcement. Leur excellente résistance mécanique, leur faible densité, leur stabilité face aux environnements agressifs et leur facilité de mise en œuvre sur site en font des alliés précieux pour la réparation et le renforcement des structures en béton. Leur utilisation permet non seulement d'augmenter la capacité portante des éléments existants, mais aussi de limiter les fissures de se propagent des et les mécanismes de dégradation en contribuant à prolongation la durée de vie des constructions.

Dans ce cadre s'inscrit notre projet à travers l'étude du comportement du composite renforcé soumis à la traction et le comportement de poutres en béton renforcées à l'aide de plaques composites en résine chargée soumises à des efforts de flexion.

Les analyses numériques s'appuient sur des simulations numériques réalisées avec le logiciel ABAQUS, basé sur la méthode des éléments finis, permettant de reproduire avec précision l'interaction entre le béton et les matériaux de renfort. Cette étude se base sur l'influence de la variation de la longueur des plaques composites, ainsi que sur les performances mécaniques globales de la poutre, en analysant particulièrement la répartition des contraintes, les déformations, les zones de dommages et les modes de rupture.

Cependant, l'étude expérimentale s'appuie sur des tests de traction sur la résine chargée, pour déterminer l'influence de la nature de la fibre, de la variation de sa longueur de et sa fraction volumique par rapport à la résine.

Ce travail a pour objectif de formuler des recommandations concrètes qui concernent le dimensionnement et le choix optimal des configurations de renfort, dans le but d'améliorer la résistance en flexion et d'assurer une meilleure durabilité des poutres renforcées.

Nous avons structuré le mémoire en quatre chapitres :

Une recherche bibliographique est réservée pour le premier chapitre. La première partie de cette recherche commence par un état de connaissance sur les matériaux composites et les fibres de renforcement dans le secteur de la construction.

La seconde partie, est consacrée à une synthèse bibliographique qui offre un aperçu global sur les matériaux composites, notamment les types de résines, les différents types de fibres, les constituantes de béton et les plaques de renforcement.

Le deuxième chapitre, est réservé à la partie expérimentale, les différentes variantes étudiées en résine époxy chargée par divers types de fibres, la procédure de préparation des fibres récupérées ainsi que les autres types sont présentés. La phase d'identification des constituants de béton et la préparation des éprouvettes et également insérée. En fin, les divers essais adoptés dans le protocole expérimental.

Le troisième chapitre est dédié à la présentation des divers résultats expérimentaux obtenus et leur analyse, on met en évidence l'impact de la variation des différents paramètres sur le comportement mécanique de la résine époxy renforcée ainsi que le comportement du couple : résine-béton.

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation numérique du couple : résine-béton, afin de mettre en évidence l'effet de la plaque de support en résine époxy renforcée et le comportement d'endommagement global du couple résine-béton.

Enfin, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale regroupant les principaux résultats expérimentaux et numériques obtenus, les apports de cette étude, et par quelques perspectives à exploiter.

CHAPITRE I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I-1) Introduction :

Ce premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique sur les différents matériaux utilisés dans la fabrication de la résine chargée et qui les rend dans le cadre des matériaux composites, ainsi que les matériaux constituant de béton à traiter.

I-2) Généralité :

En particulier, l'apparition de fissures provoquées par des contraintes mécaniques, thermiques ou environnementales fait de la dégradation des éléments de structure en béton ou en maçonnerie un frein important à la durabilité des bâtiments. Elles apparaissent au niveau des dalles souples, des murs ou d'autres porteurs et peuvent compromettre l'intégrité structurelle de l'ouvrage en plus de son attrait esthétique. Qu'elles apparaissent au niveau des dalles souples, des murs ou d'autres supports, ces fissures peuvent compromettre l'intégrité structurelle de l'ouvrage au - delà de son esthétique. Au niveau des dalles souples, des murs ou d'autres porteurs, ces fissures ont le potentiel de compromettre l'intégrité structurelle de l'ouvrage au-delà de son attrait esthétique. Les résines de réparation, telles que l'époxy et le polyuréthane, font partie des remèdes fréquemment utilisés pour traiter ces problèmes. Comme l'époxy et le polyuréthane, font partie des remèdes souvent utilisés pour traiter ces troubles.

Avec leur bonne adhérence et leur capacité de pénétration, les résines traditionnelles présentent certaines limites, telles que la récurrence des déformations, les contraintes thermiques et l'exposition prolongée à des environnements agressifs (humidité, sel et UV). Ces les inhibiteurs accélèrent la détérioration de la résine, entraînant sa décomposition, la détérioration ou éventuellement la perte de toute efficacité au fil du temps. de la résine, entraînant sa décomposition, sa détérioration ou la perte éventuelle de toute efficacité au fil du temps.

À cet concernant les recherches récentes les recherches sont concentrées concentrent sur l'utilisation de résines renforcées de fibres comme option innovante. Sur l'utilisation de résines renforcées de fibres comme option innovante. L'ajout de verre, de carbone, fibres ou des fibres de basalte à la matrice de résine permet une amélioration significative des performances mécaniques et de la résistance à la fissuration. La matrice de résine permet une amélioration significative des performances mécaniques et de la résistance à la fissuration. Ces les fibres agissent comme un squelette interne qui squelette empêche qui empêche l'ouverture des fissures, absorbe les contraintes locales et augmente la résilience du matériau. Empêche les fissures de s'ouvrir, absorbe les contraintes locales et augmente la résilience du matériau. Ont

indiqué que les composites fibre-résine présentent une résistance supérieure à la traction et à la flexion, ainsi qu'une plus grande durabilité dans des environnements variés.

L'utilisation de ces matériaux peut être adaptée à différents types de fissures (structurelles, évolutives et statiques) et est compatible avec une variété de procédés d'injection ou de recouvrement. Cette méthode est particulièrement utile pour les dalles souples, qui sont fréquemment soumises à des flexions différentielles, et les porteurs, qui sont sensibles aux variations de température et aux charges concentrées.

I-3) Histoire de la résine :

En 2022, l'auteur **Dupont** a trouvé que les résines époxy, lorsqu'elles sont utilisées comme revêtement de sol, offrent une excellente adhérence et résistance aux produits chimiques, ce qui les rend idéales pour les environnements industriels.

En 2021, l'auteur **Martin** a souligné que les revêtements de sol en résine polyester étaient particulièrement adaptés pour les espaces commerciaux, en raison de leur durabilité et de leur facilité de nettoyage.

En 2020, l'auteur **Leroux** a noté que les systèmes de résine renforcée en fibre (FRP) contribuent non seulement à la longévité des surfaces, mais également à leur esthétique grâce à la diversité des finitions disponibles.

En 2023, l'auteur **Simon** a démontré que l'utilisation de résines bio-sourcées dans les revêtements de sol représente une avancée significative.

I-3) Mécanisme de dégradation des éléments structuraux :

Les mécanismes de dégradation des éléments structuraux désignent les processus physiques, chimiques ou biologiques qui entraînent la détérioration des matériaux et, par conséquent, compromettent la stabilité et la sécurité des structures. Voici les principaux mécanismes :

I-3-1) Corrosion :

- **Description** : Il s'agit d'une réaction chimique, soit par oxydation, soit par dissolution, entre le matériau (habituellement métallique) et son environnement. Le composant (habituellement en métal) et le cadre environnemental.
- **Impact** : dégradation de la section, apparition de fissures, diminution de la cohésion.

I-3-2) Fatigue :

- **Description** : Détérioration progressive due à des chargements répétés ou cycliques, créant des microfissures.
- **Impact** : fissuration, rupture soudaine.

I-3-3) Usure et abrasion :

- **Description** : L'usure provoque par le grattage ou le contact prolongé avec d'autres surfaces.
- **Impact** : diminution de la matière, changement de la forme.

I-3-4) Détérioration chimique

- **Description** : Réactions chimiques entraînant la détérioration des matériaux, généralement sous l'influence d'agents chimiques.
- **Impact** : fragilisation, fissures, perte de résistance.

I-3-5) Effets environnementaux

- **Description** : Ensemble des facteurs environnementaux tels que l'humidité, le gel et les UV agissant de manière conjointe.
- **Impact** : dégradation de la surface, apparition de fissures.

I-3-6) Détérioration biologique

- **Description** : Influence des organismes vivants (tels que les champignons, les bactéries et les plantes) sur les substances matérielles.
- **Impact** : dégradation chimique et mécanique.

I-3-7) Détérioration thermique

- **Description** : Effets des variations thermiques, provoquant des dilatations, contractions ou délaminations.
- **Impact** : déformation, fissuration.

I-4) Les matériaux composites :

Définition :

Un matériau composite se définit par la combinaison d'au moins deux matériaux différents. L'entité issue présente des qualités supérieures par rapport à celles de ses éléments pris séparément. [2]

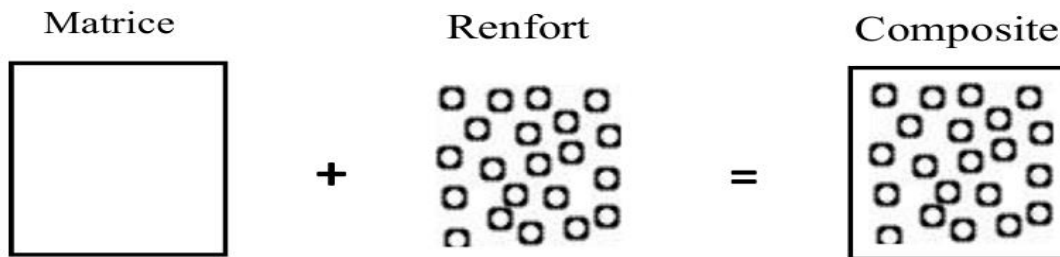


Figure I 1: Composition d'un matériau composite. (2)

I-4-1) Éléments constitutifs :

Éléments constitutifs : La structure d'un matériau composite repose sur une phase continue, la matrice, qui assure le transfert des contraintes et la protection de l'autre constituant essentiel : le renfort, lequel peut se présenter sous forme de fibres ou de particules.[2]

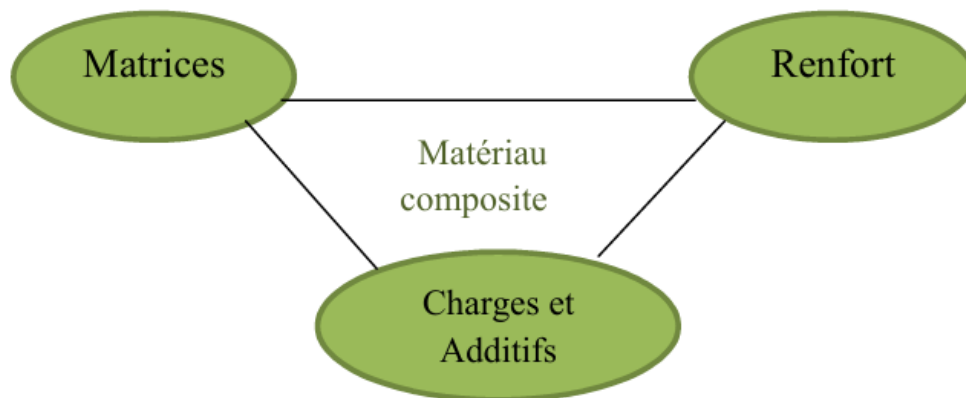


Figure I 2: Les éléments constitutifs d'un matériau composite (2)

I-5) Résine :

Une résine est un type de polymère, qu'il soit d'origine naturelle, artificielle ou synthétique. Ce matériau fondamental est essentiel à la production d'une large gamme de produits, incluant les plastiques, les textiles, les peintures (qu'elles soient liquides ou en poudre), les adhésifs, les vernis et les mousses polymères.

I-5-1) Type de résine :

On distingue principalement deux catégories de résines : les thermoplastiques et les thermodurcissables. [3]

I-5-1-a) Résines thermoplastiques :

Actuellement, les résines thermoplastiques occupent une part relativement modeste dans le secteur des composites à matrice polymère (PMC). Ces résines se distinguent par leur état solide et leur nature non réactive. Le produit fini peut être obtenu par l'application de chaleur et de pression. Contrairement aux résines thermodurcissables, les thermoplastiques offrent la possibilité d'être réchauffés et reformés en une autre forme, si le besoin s'en fait sentir. Parmi les exemples courants de résines thermoplastiques, on retrouve le polyéthylène, le polystyrène, le nylon, le polycarbonate, le poly sulfone, le sulfure de polyphénylène, et l'acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS)... etc. [3]

I-5-1-b) Résines thermodurcissables :

Les résines thermodurcissables sont les plus couramment employées dans l'industrie des composites. Leur particularité réside dans le fait qu'elles ne peuvent être transformées qu'une seule fois. Après leur polymérisation, elles deviennent infusibles et insolubles. Une fois qu'elles ont durci, il est impossible de modifier leur forme. De surcroît, même si elles sont soumises à une nouvelle augmentation de température, la résine ne retrouvera pas son état liquide ou pâteux d'origine. [3]

Les résines thermodurcissables les plus importantes sont énumérées ci-dessous :

Résine époxy, polyuréthane, polyester, vinylester, acrylique [3]

A) Résine époxy :

Définition :

La résine époxy est un polymère thermodurcissable à l'état liquide, composé de deux éléments : une base résineuse et un agent de durcissement. Leur mélange, réalisé dans des proportions précises, initie une réaction chimique appelée polymérisation, qui solidifie l'ensemble en un matériau transparent, résistant et durable. Ce matériau se distingue par sa grande adaptabilité. Facile à manipuler, il peut être poncé, lustré, teinté ou encore moulé selon les besoins. [4]

A-1) Les caractéristiques de la résine époxy :

La résine époxy est très populaire pour le revêtement des surfaces dans les contextes industriels et logistiques, en raison de ses multiples atouts pratiques. Elle se fixe librement aux surfaces et sèche vite, minimisant ainsi les interruptions de travail lors de son application. Robuste tout en étant flexible, elle supporte efficacement les impacts, les déplacements fréquents de lourdes machines et les charges conséquentes. Elle résiste également efficacement aux produits chimiques corrosifs tels que les hydrocarbures, les solvants ou les détergents puissants elle sous fixe librement aux surfaces et séché vite , minimisant ainsi les interruptions de travail lors de son application .robuste tout en étant flexible , elle supporte efficacement les impacts , les déplacements fréquents de lourdes machines et les charges conséquentes Avec sa surface lisse et sans joints, ce matériau est simple à maintenir et réduit l'accumulation de salissures ou de germes, ce qui le rend idéal pour les lieux où la propreté est primordiale. Outre ses attributs techniques, elle détient des caractéristiques. [4]

A-2) Domaine d'application :

En particulier pour sa robustesse, son poids léger et sa durabilité. On la retrouve aussi bien dans le secteur naval, automobile ou énergétique que dans la construction, la production de pièces composites ou les équipements pour les sports. son application ne se restreint pas au domaine industriel : elle a également sa place dans l'art et l'artisanat. Nombreux sont ceux qui l'exploitent pour les bijoux, de mobiliers originaux tels que les tables rivières, ou encore pour concevoir des objets décoratifs singuliers. En matière d'application sur les surfaces, l'époxy se présente généralement sous deux formes majeures. La peinture époxy, qui offre une finition lisse et brillante, est parfaite pour décorer les murs et les plafonds. L'aspect esthétique de la peinture époxy, qui offre une finition brillante et lisse, en fait un choix fréquent pour les murs et plafonds. On privilégie la résine époxy pour sa finition résistance et pérenne destinée aux sols. Dans le domaine de la Réparation et de la Rénovation : efficace pour restaurer et consolider différents matériaux, elle permet de donner une nouvelle existence à divers objets et surfaces. [5]

B) Résine polyuréthane :

Définition :

Les résines polyuréthane sont des matériaux très polyvalents, utilisés dans une gamme étendue d'industries pour leurs propriétés de résistance, leur flexibilité, et leur capacité à être adaptées à des applications spécifiques. [6]

B-1) Les caractéristiques de la résine polyuréthane :

Est solide à long terme : il supporte l'usure, le vieillissement ainsi que les conditions extrêmes telles que la chaleur, l'humidité ou encore les sollicitations répétées. Un autre atout non négligeable, c'est sa capacité à se coller librement à une variété de matériaux – que ce soit le métal, le bois, le verre, la céramique ou le textile – ce qui en fait un choix idéal pour créer des composites renforcés avec divers types de fibres. Il peut également servir de liant dans des systèmes multicouches, ce qui étend encore ses applications potentielles. Concernant sa durabilité : il supporte l'usure, le vieillissement ainsi que les conditions extrêmes telles que la chaleur, l'humidité ou encore les sollicitations répétées. Un autre atout non négligeable, c'est sa capacité à se coller librement à une variété de matériaux – que ce soit le métal, le bois, le verre, la céramique ou le textile – ce qui en fait un choix idéal pour créer des composites renforcés avec divers types de fibres. [7] [8] [9] [10]

B-2) Domaine d'application :

Dans le domaine de la construction, on l'emploie en tant que mousse isolante pour les murs, les toits ou les planchers, offrant ainsi une isolation thermique et acoustique hautement performante. Dans le secteur automobile, on l'utilise pour la production de sièges, de revêtements intérieurs et même de certaines pièces extérieures, surtout grâce à sa légèreté et sa robustesse. Il est également omniprésent dans l'ameublement : les matelas et les meubles rembourrés doivent fréquemment leur confort aux mousses souples de polyuréthane. [11]

C) Résine Vinyle :

Définition :

Les résines vinylester sont des polymères thermodurcissables caractérisés par la présence de groupes ester réactifs dans leur structure. Elles sont largement employées dans la fabrication de matériaux composites en raison de leur excellente résistance à la corrosion, de leurs propriétés mécaniques supérieures et de leur durabilité [12].

C-1) Les caractéristiques de la résine Vinyle :

La résine vinyle est un matériau prisé pour sa fiabilité et sa polyvalence dans une multitude de contextes. Elle supporte parfaitement les produits chimiques, ce qui la rend parfaite pour les environnements parfois hostiles. Elle présente également d'excellentes propriétés mécaniques, tout en offrant une bonne adhésion à diverses surfaces, rendant son utilisation aisée sur différents matériaux. [12]

B-2) Domaine d'application :

On les observe dans divers domaines tels que l'industrie, la construction de navires, l'automobile et même les équipements sportifs. On les utilise notamment pour la production de pièces soumises à la corrosion, telles que les réservoirs ou les coques de navires, mais aussi pour des éléments légers et robustes comme les pare-chocs ou certains éléments de pont. [12]

D) Résine Acrylique :

Définition :

La résine acrylique, une résine chimique, est un revêtement synthétique fabriqué à partir de polymères acryliques. Elle est appréciée pour sa transparence, sa durabilité, et sa résistance à l'eau et à la lumière [13].

D-1) Les caractéristiques de la résine Acrylique :

Cette résine est très prisée en raison de sa simplicité d'emploi et de la qualité de son impression. Elle se fixe vite, ce qui économise du temps lors des travaux, tout en procurant une finition brillante et attrayante. Sa surface est conçue pour résister à l'abrasion et aux frottements quotidiens, ce qui lui confère une durabilité même dans des conditions rigoureuses. Elle résiste également parfaitement aux produits chimiques, ce qui en fait une option appropriée pour des milieux plus hostiles. Ce qui la rend d'autant plus attrayante, c'est sa faculté de maintenir sa couleur et son éclat au fil des ans, malgré les conditions extérieures.

D-2) Domaine d'application :

La résine acrylique est utilisée dans plusieurs secteurs :

Construction : Elle est présente dans les revêtements de sol ainsi que dans les toitures.

Mobilier : Elle est utilisée pour préserver et améliorer l'apparence des surfaces en bois et d'autres substances.

Secteur du textile : Cela renforce la solidité et la durabilité des tissus.

Produits de consommation : Elle est un élément crucial dans plusieurs produits finis tels que les peintures et les colles.

E) Résine Polyester :

Définition :

La résine polyester, ou résine polyester insaturée (UPR), est un polymère thermodurcissable obtenu par la réaction chimique entre un acide dibasique et un diol. Cette réaction forme de longues chaînes polymères qui se transforment en un matériau solide et durable une fois durci. La résine polyester est fréquemment utilisée en combinaison avec des matériaux de renforcement, tels que la fibre de verre, pour fabriquer des matériaux composites possédant des propriétés mécaniques renforcées. [14]

E-1) Les caractéristiques de la résine Polyester :

E-2) Domaine d'application :

Cette résine est très prisée en raison de sa simplicité d'emploi et de la qualité de son impression. Elle se fixe vite, ce qui économise du temps lors des travaux, tout en procurant une finition brillante et attrayante. Sa surface est conçue pour résister à l'abrasion et aux frottements quotidiens, ce qui lui confère une durabilité même dans des conditions rigoureuses. Elle résiste également parfaitement aux produits chimiques, ce qui en fait une option appropriée pour des milieux plus hostiles. Ce qui la rend d'autant plus attrayante, c'est sa faculté de maintenir sa couleur et son éclat au fil des ans, malgré les conditions extérieures. [15]

E-1)) Les caractéristiques de la résine Polyester :

Cette résine est très prisée en raison de sa simplicité d'emploi et de la qualité de son impression. Elle se fixe vite, ce qui économise du temps lors des travaux, tout en procurant une finition brillante et attrayante. Sa surface est conçue pour résister à l'abrasion et aux frottements quotidiens, ce qui lui confère une durabilité même dans des conditions rigoureuses. Elle résiste également parfaitement aux produits chimiques, ce qui en fait une option appropriée pour des milieux plus hostiles. Ce qui la rend d'autant plus attrayante, c'est sa faculté de maintenir sa couleur et son éclat au fil des ans, malgré les conditions extérieures. [15]

E-2) Domaine d'application :

La résine est une substance extrêmement adaptable que l'on retrouve dans de nombreux aspects de la vie quotidienne. Elle est fréquemment employée dans l'industrie nautique pour la fabrication de coques de navires et d'autres constructions maritimes, souvent renforcées par de la fibre de verre afin d'augmenter leur résistance. Dans le domaine de l'automobile, elle favorise

la création de composants de carrosserie qui sont à la fois légers et résistants, contribuant ainsi à réduire le poids des véhicules sans sacrifier leur solidité. Dans le bâtiment, on l'utilise pour créer des éléments décoratifs comme des panneaux, des encadrements de fenêtres ou divers détails architecturaux. Elle est également d'une grande utilité en termes de rénovation, notamment pour colmater des fissures dans le béton ou consolider des structures affaiblies. [16]

I-6) Fibre :

Une fibre se définit comme un filament long, fin et souple, dont le diamètre varie généralement entre 7 et 30 micromètres. Les fibres continues présentent un rapport longueur/diamètre très élevé, souvent supérieur à cent, ce qui leur confère des propriétés particulières. Elles sont souvent beaucoup plus solides et rigides que le matériau équivalent sous forme massive. À titre d'exemple, un fil en acier peut peser jusqu'à trois à quatre fois plus qu'une fibre polymère offrant une résistance mécanique similaire [17].

Les fibres utilisées comme renforts dans les matériaux composites doivent répondre à plusieurs exigences :

Excellentes propriétés mécaniques,

Faible densité,

Bonne compatibilité avec les matrices polymères,

Facilité de mise en œuvre,

Coût relativement faible.

I-6-1) Formes commerciales des renforts :

Les fibres peuvent être disponibles sous diverses configurations :

Forme filaire (fil, mèche, etc.),

Forme textile plane (tissus, mats, etc.),

Forme tridimensionnelle ou multiaxiale (tresses, tissus complexes).

I-6-2) Principaux types de fibres :

I-6-2-1) Fibre de verre :

Connue également sous le nom de fibre glass, elle est issue de composants minéraux comme la silice, l'alumine, la chaux ou encore l'oxyde de bore. Ce type de fibre est réputé pour

sa légèreté, sa robustesse et sa bonne tenue mécanique. Même si ses performances mécaniques sont inférieures à celles de la fibre de carbone, elle reste moins cassante et son coût de production est nettement plus abordable. Elle présente aussi des avantages notables par rapport aux métaux, notamment en termes de poids et de flexibilité de mise en forme [18].



Figure I 3: Morphologie et structure des fibres de verre.

1-a) Caractéristiques de la fibre de verre :

Bonne résistance aux chocs et à la traction.

Excellente isolation thermique et électrique.

Mise en forme aisée.

Moins fragile que les fibres de carbone.

1-b) Applications :

Textiles domestiques et industriels.

Pneumatiques, plastiques renforcés.

Composants de bateaux (coques, sièges).

Canne à pêche, tuyères, panneaux décoratifs.

I-6-2-2) Fibre de carbone :

Aussi appelée fibre de graphite, elle est constituée de filaments très fins de carbone, issus principalement de précurseurs comme le polyacrylonitrile (PAN) ou le brai.

L'arrangement cristallin des atomes de carbone, orienté parallèlement à l'axe des fibres, lui confère une résistance et une rigidité exceptionnelles [19].



Figure I 4: Morphologie et structures des fibres de carbone utilisées dans les composites.

2-a) Caractéristiques de la fibre de carbone :

Résistance à la traction élevée (supérieure à l'acier),

Rigidité importante,

Bonne résistance à la fatigue,

Stabilité chimique et résistance à la corrosion.

2-b) Applications :

Aéronautique : structures allégées,

Automobile : véhicules de haute performance,

Sports : vélos, raquettes, équipements de compétition,

Défense : blindages, drones, équipements tactiques.

I-6-2-3) Fibre de poil de chameau :

Le poil de chameau, classé parmi les fibres animales naturelles, est principalement issu des camélidés tels que le dromadaire ou le chameau de Bactriane. Cette fibre est prélevée généralement pendant la période de mue saisonnière à l'aide de techniques de tonte ou de peignage soigneux. [20]



Figure I 5: Morphologie et structure des fibres de poil de chameau utilisées comme renfort naturel dans les matériaux composites.

3-a) Caractéristiques de la fibre poil de chameau :

Isolation thermique et phonique : Grâce à sa structure creuse, cette fibre est utilisée comme isolant naturel dans les toitures, cloisons et sols, particulièrement adaptée aux bâtiments écologiques ou conçus selon des principes bioclimatiques.

Constitution de panneaux biosourcés : Elle peut être incorporée à des liants naturels tels que l'argile, la chaux ou le plâtre, pour concevoir des panneaux composites légers, alliant isolation et faible impact environnemental.

Textiles fonctionnels : Elle entre dans la fabrication de matériaux textiles destinés à l'habitat temporaire ou traditionnel, comme les toiles de tente, bâches ou revêtements muraux dans les régions arides ou nomades. [21]

3-b) Applications :

Isolants écologiques : Exploitée comme matériau isolant dans les parois, toitures et planchers, elle contribue à réduire les pertes d'énergie tout en assurant un bon confort acoustique.

Panneaux composites naturels : Combinée à des matériaux minéraux comme la chaux ou l'argile, elle permet la fabrication de solutions constructives biosourcées, efficaces et légères.

Textiles architecturaux : Appliquée dans la confection d'éléments souples pour les constructions nomades, elle offre résistance, durabilité et adaptabilité aux conditions climatiques extrêmes. [21.]

I-6-2-4) Fibre de Polyéthylène :

Cette fibre est fabriquée à partir de polyéthylène de masse molaire élevée, un polymère aliphatique cristallin. Elle est inerte chimiquement, n'a pas de solvant à température ambiante, et présente d'excellentes propriétés mécaniques. Elle offre également une grande stabilité thermique à basse température [21].



Figure I 6: Morphologie et structure dans les fibres de Polyéthylène utilisées dans les composites.

4-a) Caractéristiques de la fibre de Polyéthylène :

Résistance et module élevés (plus résistante que l'acier),

Absorption d'énergie élevée (excellente résistance aux chocs),

Bonne résistance à la fatigue,

Faible usure,

Excellente tenue chimique.

4-b) Applications :

Coques de bateaux, équipements de protection, réservoirs,

Renforcement des bétons (amélioration de la ductilité),

Filets de pêche, vêtements de protection.

I-6-2-5) Fibre de polypropylène :

Matériau thermoplastique introduit dans le secteur textile dans les années 1970, le polypropylène est aujourd'hui l'une des fibres synthétiques les plus utilisées après le polyester, le nylon et l'acrylique. Il se distingue par sa légèreté et sa résistance chimique [22].



Figure I 7: Morphologie et structure des fibres de Polypropylène utilisées dans les composites.

5-a) Caractéristiques de la fibre de polypropylène :

Excellente résistance aux agents chimiques (acides et bases),

Bonne résistance à l'abrasion,

Résistance naturelle aux micro-organismes,

Coût de production réduit,

Faible absorption d'eau.

5-b) Applications :

Revêtements de sols industriels.

Béton renforcé et éléments préfabriqués.

Mortiers spécialisés.

Textiles techniques pour l'industrie.

I-7) Le béton :

Le béton est un matériau composite largement utilisé pour la réalisation d'éléments porteurs dans le secteur du bâtiment et les ouvrages de génie civil. Il est constitué essentiellement de granulats fins et grossiers (représentant environ 60 à 78 % du volume), de ciment (7 à 14 %) et d'eau (14 à 22 %). Le mélange de l'eau avec le ciment produit une pâte qui durcit par hydratation. Cette pâte, combinée avec le sable, forme le mortier, dont le rôle est d'assurer la cohésion avec les gros granulats pour créer un ensemble solide. On peut également y incorporer des adjuvants et/ou des additions (< 5 %) afin d'optimiser certaines propriétés du béton à l'état frais ou durci. Ce chapitre présente les différents constituants du béton — ciments, granulats, eau, adjuvants et additions minérales — ainsi que leurs principales caractéristiques physico-chimiques. [23]

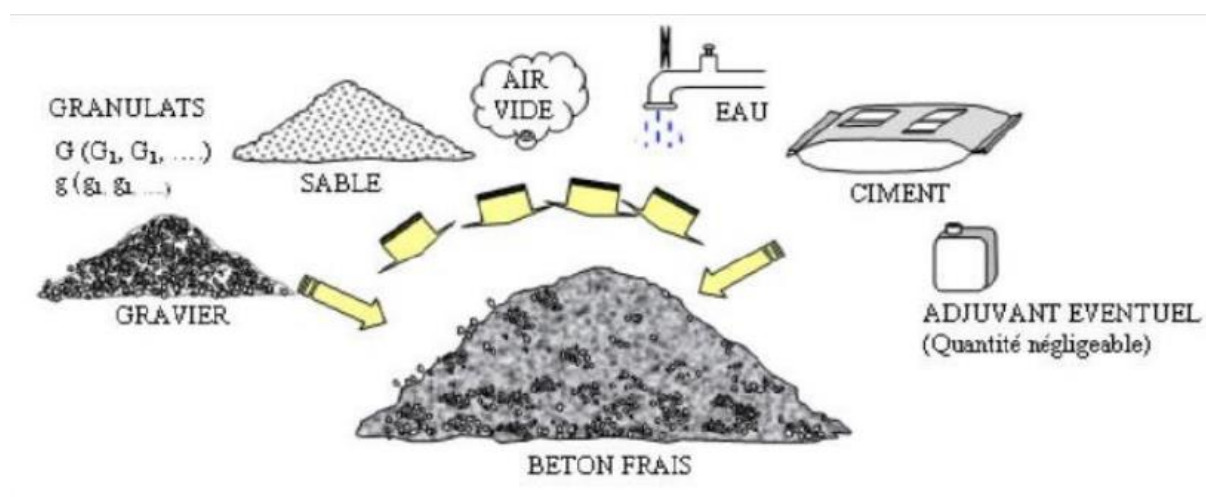


Figure I 8: Les différents constituants du béton.

I-7-1) Les constituants du béton :

I-7-1-1) Le ciment :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau capable d'assurer l'adhérence et la cohésion entre les composants du béton. Il joue un rôle fondamental dans la solidification du mélange en durcissant au contact de l'eau, même en milieu submergé. Cette aptitude, propre aux ciments hydrauliques, en fait l'élément central de la formulation du béton, en assurant le passage d'un mélange initialement fluide à un matériau rigide et résistant [23].

I-7-1-2) L'eau :

Toutes les eaux ne sont pas adaptées à la fabrication du béton. Certaines peuvent contenir des impuretés susceptibles de nuire aux performances du matériau, tant sur le plan physique que mécanique. Une eau inadéquate peut altérer la prise, réduire la résistance

mécanique, provoquer des défauts esthétiques (taches, efflorescences) ou encore nuire à la durabilité de l'ouvrage en accélérant la corrosion des armatures ou en déstabilisant la matrice cimentaire [23].

I-7-1-3) Les granulats :

Les granulats sont des particules minérales, naturelles ou transformées, dont les dimensions varient entre 0 et 125 mm. Combinés à la pâte cimentaire, ils forment l'ossature du béton. On distingue plusieurs catégories selon leur origine :

Granulats naturels : issus directement de formations géologiques meubles (comme les alluvions) ou massives, sans autre transformation que mécanique (concassage, tamisage, lavage).

Granulats artificiels : obtenus à partir de processus industriels, incluant souvent des traitements thermiques.

Granulats recyclés : dérivés de matériaux inorganiques déjà utilisés dans la construction, tels que les bétons de démolition, après traitement adéquat.

I-7-1-4) Les adjuvants :

Les adjuvants sont des substances ajoutées en faible quantité (généralement moins de 5 % de la masse du ciment) dans la formulation du béton. Le plus souvent à base de composés organiques, ils sont fournis sous forme de solutions aqueuses et sont conçus pour modifier certaines caractéristiques du béton. Leur effet se manifeste surtout sur le comportement du béton frais (travailabilité, fluidité) et sur la vitesse de prise et de durcissement. Certains adjuvants sont formulés à partir de combinaisons de molécules actives, leur conférant des fonctions multiples.

Le mode d'action des adjuvants :

Mécanique : en modifiant la consistance du mélange.

Physique : en agissant sur la tension superficielle des composants.

Chimique : en modifiant la vitesse de prise du ciment. [23].

I-7-2) Comportement mécanique du béton :

I-7-2-1) Le béton en compression :

La résistance à la compression est l'une des propriétés mécaniques les plus importantes du béton durci. Elle est généralement évaluée à 28 jours d'âge, conformément à la norme NF EN 12390-3, et est notée f_{c28} . Cette mesure se fait par l'application d'une charge axiale croissante sur une éprouvette cylindrique ou cubique.

Connaître les performances mécaniques du béton est essentiel pour garantir la sécurité et la fiabilité des structures. En tant que matériau fragile, le béton présente un comportement peu ductile lorsqu'il est soumis à des efforts croissants. Avant sa rupture, il ne manifeste que peu de déformations visibles. Il offre toutefois une excellente résistance en compression, contrairement à sa faible résistance en traction.

Les performances mécaniques du béton sont influencées par plusieurs facteurs, notamment :

Le type et la classe de ciment utilisés ;

La qualité des granulats ;

Le rapport eau/ciment et les dosages des constituants ;

Les conditions de mise en œuvre et de cure. [23]

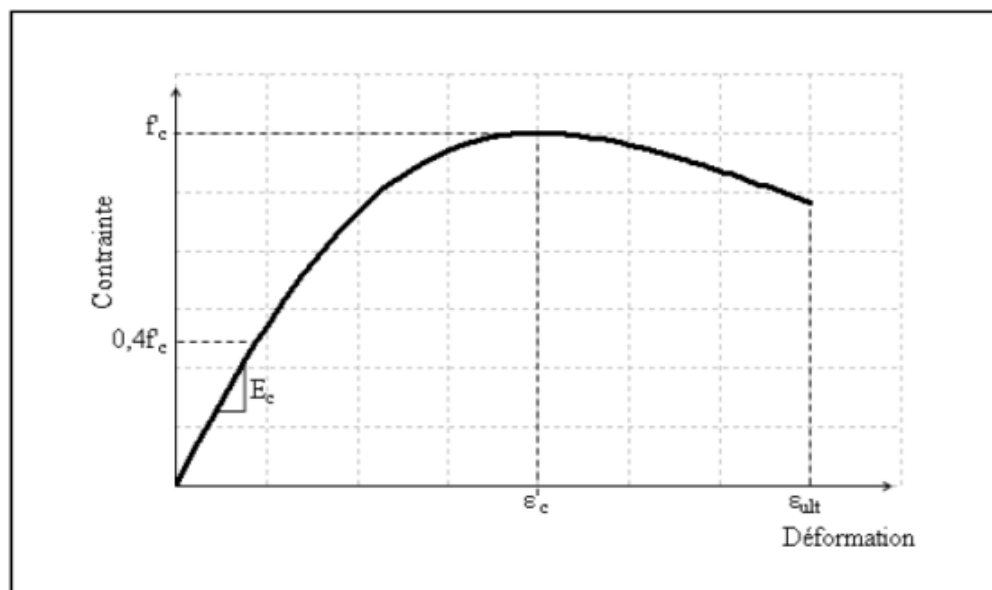


Figure I 9: Loi de comportement du béton en compression sous chargement statique (23).

I-7-2-2) Le béton en traction :

Comparée à la résistance en compression, la résistance à la traction du béton (f_{t28}) est beaucoup moins élevée et souvent négligée dans les calculs courants. Elle est pourtant importante dans l'analyse des fissurations. Cette propriété tend à diminuer davantage si des fissures de retrait apparaissent dans le béton.

Selon les normes actuelles, trois méthodes principales permettent d'évaluer la résistance à la traction :

L'essai de traction directe,

L'essai de fendage (ou traction indirecte),

L'essai de flexion. [23]

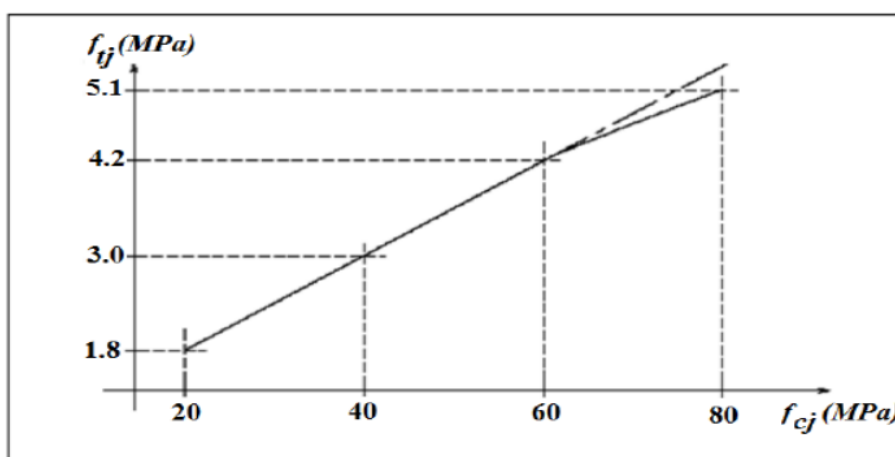


Figure I 10: Évolution de la résistance à la traction f_{tj} en fonction de celle.

I-8) Conclusion :

Ce premier chapitre constitue une base théorique essentielle pour le présent mémoire. Il a permis d'explorer les connaissances actuelles relatives aux matériaux employés dans le traitement des fissures structurales, en mettant particulièrement l'accent sur les résines armées de fibres. Dans un premier temps, les mécanismes de dégradation affectant les plateformes en béton ou en résine ont été analysés, ainsi que les limites rencontrées avec l'usage de résines traditionnelles. Par la suite, une attention particulière a été portée sur les matériaux utilisés, notamment les fibres de renforcement (verre, carbone, poil de chameau) et les matrices polymères, en soulignant leurs propriétés mécaniques, physiques et chimiques. L'étude du béton et de ses constituants a également permis de mieux comprendre les interactions

envisageables avec les composites. L'ensemble de ces éléments théoriques vient appuyer les orientations techniques retenues pour la suite du travail, axée sur l'amélioration des performances et de la durabilité des solutions de réparation.

CHAPITRE II
MÈTHODE EXPÉRIMENTALE

II-1) Introduction :

Ce chapitre présente le protocole expérimental entrepris dans le cadre de notre travail et qui est subdivisé en trois parties.

La première partie est relative à la formulation du béton à l'aide de la méthode de Dreux-Gorisse, et à la présentation des essais d'identification et de caractérisation des constituants de béton. Des essais à l'état frais, notamment l'essai d'affaissement, sont effectués pour caractériser la consistance du béton, tandis que des essais mécaniques à l'état durci permettent d'évaluer ses performances structurales. Cette partie est finalisée par la confection des éprouvettes permettant la détermination des caractéristiques mécaniques du béton ainsi que pour préparer le modèle d'essai de couple : béton-résine.

Dans la deuxième partie de ce protocole expérimental, nous avons passé par deux phases de préparation des échantillons. En premier lieu, nous avons procédé à la préparation des fibres à incorporer. Deuxièmes, nous avons entamé la préparation des éprouvettes en résine époxy non renforcée et renforcée par les divers types de fibres. La quantité de la résine et de fibres nécessaires a été calculée afin de remplir des éprouvettes de type sous forme Ban Dog, destinées à l'essai de traction. Ces préparations constituent une étape clé pour assurer la mise en œuvre optimale de la couche de résine renforcée, appliquée comme un revêtement de l'élément de structure.

La troisième partie est consacrée à la préparation du modèle expérimental, le couple béton-résine. Des plaques en résine renforcée par des fibres coulées sur des éprouvettes en béton fissuré dans l'axe, sont préparées, afin de confirmer l'efficacité de la réparation des dommages en utilisant la résine renforcée.

II-2) Fabrication des éprouvettes en béton :

La fabrication des éprouvettes en béton inclut des essais préliminaires pour caractériser le matériau (ciment, sable, gravier et eau), puis la formulation selon la méthode Dreux-Gorisse pour optimiser la composition.

▪ Les matériaux utilisés :

Dans notre formulation de béton on a utilisé les matériaux suivants :

A) Ciment :

Produit conçu et fabriqué sous système de management de la qualité certifié AFAQ ISO 9001 le ciment utilisé est un ciment de CEM II/A-L 42.5R.

➤ La fiche technique de ciment :

Informations Générales :

Nom du produit : Ciment Portland de Calcaire **CEM II/A-L 42,5 R**.

Classe de ciment : **CEM II/A-L 42,5 R**.

Certification : **ISO 9001** (AFAQ).

Norme de référence : **NF EN 197-1, NF EN 196-1, NF EN 196-3**.

Norme de fabrication : norme Algérienne **NA 442-2013**.

Conditionnement : Sac 25 kg / Big Bag.



Figure II 1 : Ciment portland composé CEM/A-L 42.5 R

➤ Analyse chimique :

Tableau II 1 : La composition chimique de ciment.

Propriété	Valeur
Calcaire (CaCO_3)	80-94%
Silice (SiO_2)	20-25 %
Alumine (Al_2O_3)	4-7 %
Fer (Fe_2O_3)	2-4 %

➤ Propriétés physiques :

Densité apparente : 1,15 - 1,30 g/cm³.

➤ Propriétés mécaniques :

Résistance à la compression : 42,5MPa.

Résistance à la flexion : 6MPa.

B) Sable :

En intégrant deux types de sable : le sable fin provenant de Boussaâda et le sable 0/3 de Carrière Oued El Berdi.

C) Graviers :

Le gravier, avec des granulométries de 3/8 et 8/15, extrait de la carrière de Oued El Bardi.

D) L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage est la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec de béton. Elle est nécessaire pour l'hydratation du liant, le mouillage des granulats et la facilité de mise en place du béton. [\[24\]](#)

➤ Les analyses chimiques :

Lieu de prélèvement Bouira F11 pole université de Bouira :

Tableau II 2 : Les analyses chimiques de l'eau.

Paramètre	Résultat	Interprétation / Limite
Chlorures (Cl^-)	130,28 mg/L	En dessous de la limite typique de 2000 mg/L, acceptable pour le béton.
Sulfates (SO_4^{2-})	97,05 mg/L	Acceptable, ne devrait pas causer de dégradation du béton.
Sodium (Na^+)	94 mg/L	À surveiller mais généralement toléré dans cette gamme.
Potassium (K^+)	1,1 mg/L	Faible, généralement sans impact.
Calcium (Ca^{2+})	262,4 mg/L	Peut influencer la prise du ciment, mais reste dans un ordre acceptable.
PH	7,19	Parfait, dans la plage recommandée (6,5 – 8,5).

E) Adjuvant :

Nous avons employé un superplastifiant de nouvelle génération, à haute capacité de réduction d'eau pour béton, fourni par la société Sika.



Figure II 2 : Superplastifiant.

➤ **La fiche technique :**

Nome de produit : SikaPlast -40 Pro (superplastifiant haut réducteur d'eau, a base de polycarboxylates modifiés.

Conditionnement : 5Kg

Duré de coacervation : 12mois

Couleur : liquide brun clair à foncé.

Densité : $1,055 \pm 0,015$

Valeur de ph : $4,5 \pm 1$

Teneur totale en Lons chlorure $\leq 0,1\%$

Normes : NF EN 934-2 Tab 3.1 et 3.2.

II-2-1) Essais d identifications et caractérisations de béton :

En fait une série d'essai sur les matériaux constitutifs de béton pour la garantie de béton.

II-2-1-a) Analyse granulométrique :

Nous avons réalisé selon la norme (EN-933-2), Cette norme définit la méthode d'essai pour déterminer la granulométrie des agrégats.

Tableau II 3 : Analyse granulométrique.

Tamis (mm)	Passant (%)			
	Sable fin	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15
20	–	–	–	100
16	–	–	–	96,7
14	–	–	–	93,5
12,5	–	–	–	80,1
10	–	–	99,5	50,9
8	–	–	98,3	18,6
6,3	–	–	–	3,5
5	–	96,6	48,7	–
4		83,1	–	–
3,15	–	71,6	12,2	–
2	99,9	–	–	–
1,6	–	46	3,4	–
1	99,7	24,4	1,9	–
0,5	99,1	12	1,1	–
0,125	12,9	2,86	0,5	–
0,08	1	0,5	1	–
0,063	0,9	–	–	–
FOND	0,5	0,1	0	0,5

Les courbes :

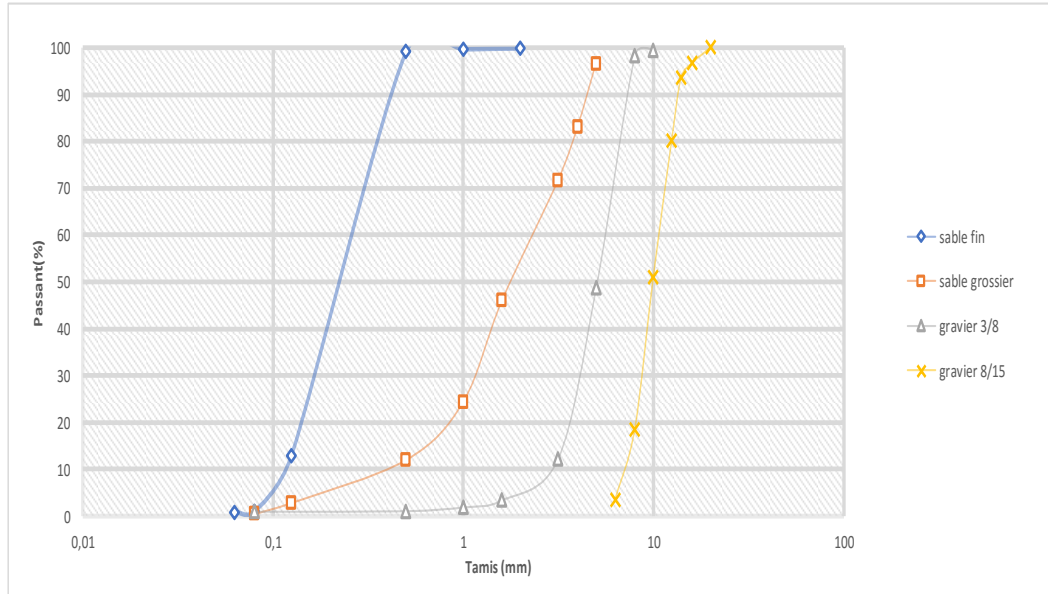


Figure II 3 : La courbe granulométrique.

➤ **Calcul du module de finesse** : le calcul se fait selon la norme (NFP 18-541) :

$$Mf = \frac{1}{100} \sum \text{refus cumulés}(0, 125; 0, 5; 1; 1, 6; 3, 15; 4; 5)$$

Mf=2,813

Notre type de sable est un peu grossier

1.8 < Mf < 2.2 sable est peu à trop fin.
2.2 < Mf < 2.8 sables de meilleure qualité granulaire pour les bétons.
2.8 < Mf < 3.3 Le sable est un peu grossier, donnera un béton peu résistant mais moins maniabilité.

II-2-1-b) La masse volumique :

Le volume d'un corps de forme géométrique déterminée peut être calculé à partir de ses dimensions mesurées. En revanche, pour un matériau de forme indéfinie ou arbitraire, la masse volumique se répartit en deux catégories distinctes.

b-1) La masse volumique apparente (ρ_{app}):

Est le rapport de la masse des grains solides plus les vides entre les grains sur le volume apparent.

$$\rho = \frac{M}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

CHAPITRE II : METHODE EXPERIMENTALE

M : la masse de l'échantillon seul est exprimée avec la relation suivante : $M = (M2 - M1)(g)$

M2 : la masse totale(g)

M1 : la masse de récipient(g)



Figure II 4 : La masse volumique apparente de gravier 3/8.

V : le volume de récipient (cm^3)

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II 4 : Résultats de l'essai de la masse volumique apparente.

Type de matériaux	La masse volumique apparente ρ (g/cm ³)
Sable fin	1,485
Sable grossier	1,569
Gravier 5/8	1,486
Gravier 8/15	1,3753

b-2) La masse volumique absolue ρ_{ab} :

Est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains.

$$\rho_{ab} = \frac{M}{V_2 - V_1} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

M : la masse de l'échantillon (g).

V1 : le volume initial (cm³).

V2 : le volume final (cm³).



Figure II 5 : La masse volumique absolue de sable fin.

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau suivante :

Tableau II 5 : Les propriétés chimiques de ciment.

Les matériaux	La masse volumique absolue (g/cm ³)
Sable fin	2,352
Sable grossier	2,512
Gravier5/8	2,534
Gravier8/15	2,5

II-2-1-c) Essai d'équivalent de sable (NF P18-598) :

$$ESV(\%) = \frac{H2}{H1} \times 100$$

$$ESP(\%) = \frac{H'2}{H1} \times 100$$

H1 : la hauteur totale y compris le floculat.

H2 : la hauteur du sable seulement.

H'2 : La hauteur du sable propre donnée par piston taré.



Figure II 6 : L'équivalent de sable.

Tableau II 6 : Résultats de l'essai équivalent de sable.

TYPE DE SABLE	ESV (%)	ESP (%)
SABLE 1	89,797	87,189
SABLE 0/3	78,881	71,439

Selon la norme NF P 08 501 :

Le sable 1 : sable fin.

Sable 0/3 : sable grossier.

II-2-1-d) Essai de la consistance :

Temps de prise à 20°C Selon la norme (NF P 15-473-NF EN 196-3) :



Figure II 7 : L'essai de consistance.

CHAPITRE II : METHODE EXPERIMENTALE

On a effectué une série d'essais de rapport E/C les résultats sont indiqués **dans le tableau suivant** :

Tableau II 7 : les résultats d'essai d'enfoncement de la sonde de l'appareil Vicat.

Masse de ciment(g)	Masse de l'eau(g)	Rapport E/C	Rapport C/E	d(cm)
500	75	0,15	6,666666667	3,5
500	100	0,20	5	3,2
500	125	0,25	4	0,7
500	130	0,26	3,846153846	0,5
500	170	0,34	2,941176471	0

La courbe de E/C :

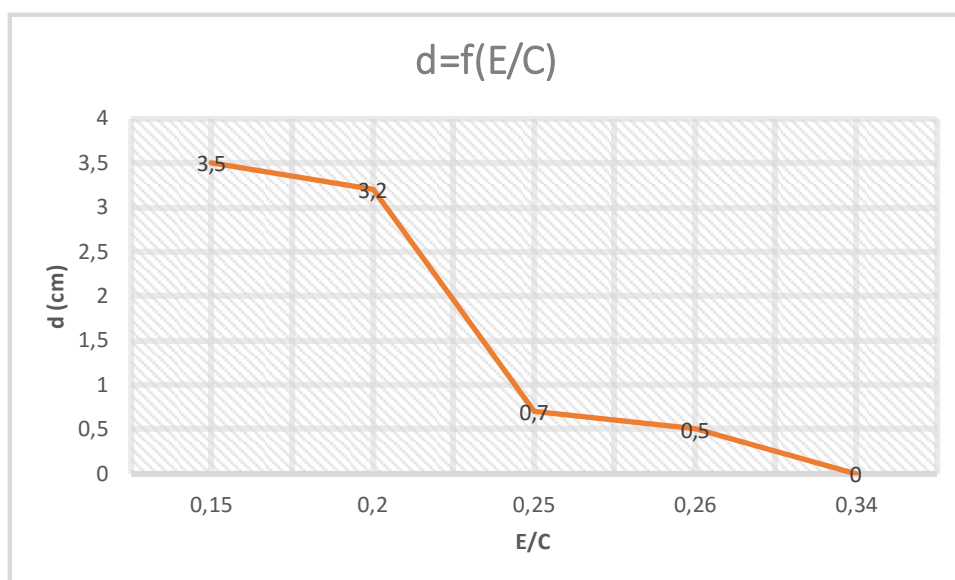


Figure II 8 : Courbe représentant la dimension en fonction de rapport E/C.

Tableau II 8 : Tableau des résultats.

Masse de ciment(g)	Masse de l'eau(g)	Rapport E/C	Rapport C/E	d(cm)
500	125	0,25	4	0,7

II-2-1-e) Essai de prise :

Pour déterminer la valeur du début et de la fin de la prise.

e-1) Début de prise :

Réalisation de l'essai de prise à l'aide de l'appareil de Vicat, selon les exigences de la norme NF P 15-473-NF EN 196-3.

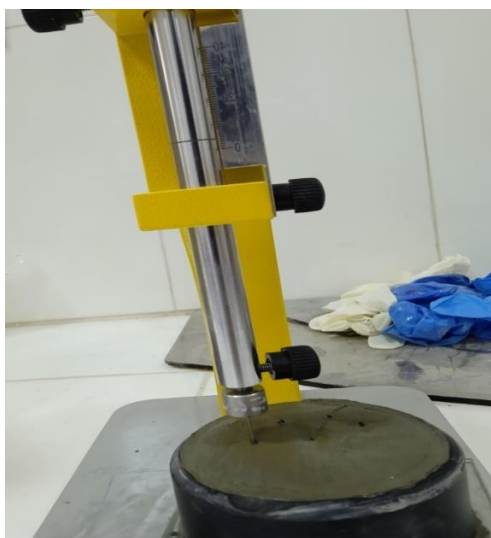


Figure II 9 : Résultats de début de prise.

Tableau II 9 : Les résultats de l'essai de début de prise de deux échantillons.

Temps (min)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	100	120	140	160
Distance (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	4
Température(°C)	20	20	20	19	19	17	17	17	16	16	16	16	16

La présentation graphique :

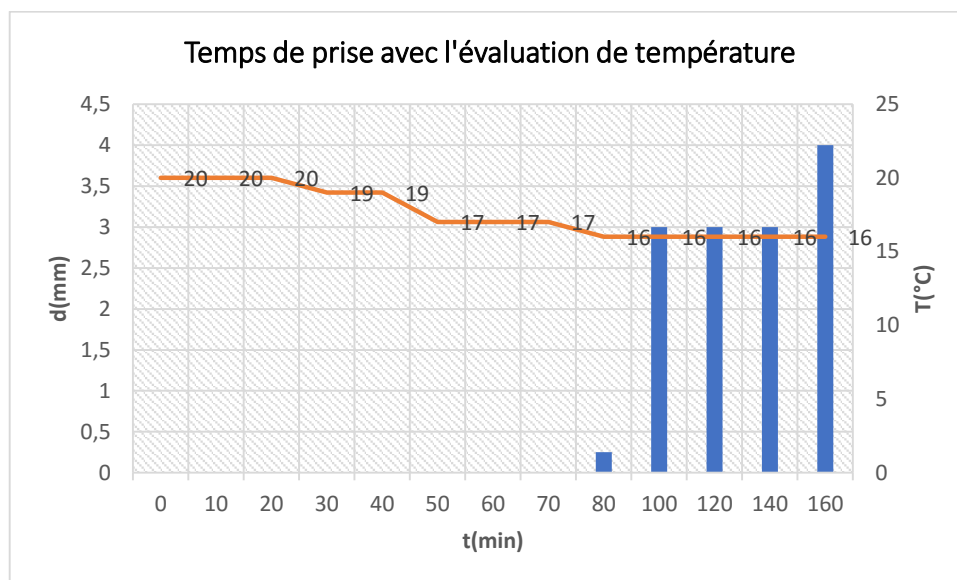


Figure II 10 : Présentation graphique des résultats de l'essai de début de prise.

Résultat de début de prise de ciment :

$T = 160min$ Avec $d=4mm$.

e-2) Fin de prise :

Le temps dans le cas de pâte est durci, l'aiguille ne s'enfonce plus est : **$T=360min$ (6 heures).**



Figure II 11 : Essai de fin de prise.

II-2-2) Formulation de béton :

Pour préparer le mélange des quantités nécessaires, on a utilisé la méthode de Dreux Gorisse, Cette méthode permet de calculer la quantité de (ciment C, sable S, gravier G, eau E et adjuvant) pour un mètre cube de béton.

Les paramètres de calcul principaux :

Tableau II 10 : Quelques paramètres de calcul.

Paramètre	Symbole	Valeur
La résistance à la compression de béton a 28j	f_{c28}	30Mpa
(résistance désirée) La résistance moyenne en compression du béton a 28	σ'_{28}	34,5Mpa
La classe vraie de ciment	σ'_c	55Mpa
Coefficient granulaire	G	0,45
Le dosage en ciment en Kg par m ³ de béton	C	350Kg
La masse volumique absolue de ciment	ρ_c	3,1Kg/m ³
Le diamètre maximal des granulats	D max	15mm
Le pourcentage de superplastifiant	% de sup	2%

Les lois de calcul :

- 1) $\sigma'_{28} = 1,15 \times f_{c28}$
- 2) $\sigma'_{28} = G \cdot \sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$
- 3) $y = 50 - \sqrt{D} + K'$
- 4) $c = \frac{C}{3,1}$

CHAPITRE II : METHODE EXPERIMENTALE

La quantité approximative des matériaux pour réaliser 1m^3 de béton :

Tableau II 11 : Les quantités des matériaux

Constituants	Masse (kg)	$\rho_{\text{app}}(\text{Kg/l})$	Volume (l)
Sable fin	396,469	1,485	266,982
Sable 0/3	334,349	1,569	213,097
Gravier3/8	188,436	1,486	130,316
Gravier8/15	778,665	1,375	588,953
EAU	179,58	1	179,58
Ciment	350	1	350
Adjuvant	7	1	7

II-2-2-1) Essai sur le béton frais :

➤ Essai de cône d Abrams :

L'affaissement au cône d Abrams (NF EN 12350-2) l'essai est effectué sur le béton frais à l'état fluide.

Description de cône :



Figure II 12 : Le cone d'Abrams.

Les dimensions :

Le diamètre supérieur $d_1=10\text{cm}$.

Le diamètre inférieur $d_2=20\text{cm}$.

La hauteur $H=30\text{cm}$.

Volume totale : $V=5498.8\text{ cm}^3$.

Le mélange de béton préparé selon la formulation retenue.

La classe d'affaissement de béton selon la norme (NF EN 206/5).

Tableau II 12 : Classe d'affaissement.

Classe	Plasticité	Affaissement (cm)
S1	Ferme	1 ; 4
S2	Plastique	5 ; 9
S3	Très plastique	10 ; 15
S4	Fluide	16 ; 21
S5	Très fluide	≥ 22

Résultat de l'essai :



Figure II 13 : Résultats de l'essai de l'affaissement.

Résultats de l'essai de l'affaissement : A=8cm

Notre classe de béton est S2 de plasticité plastique.

II-2-2-2) Confection des éprouvettes :

La fabrication d'éprouvettes en béton est une étape essentielle pour évaluer la résistance mécanique du matériau. Ces éprouvettes permettent de réaliser des essais normalisés, garantissant la qualité et la conformité du béton.

Types d'éprouvettes utilisées

- Éprouvettes cylindriques (16 ϕ 32) : Les éprouvettes cylindriques, mesurant 16 cm de diamètre et 32 cm de hauteur (16 \times 16 \times 32 cm), sont des échantillons normalisés utilisés

pour réaliser l'essai de compression selon la norme NF EN 12390-3. Fabriquées à partir du béton testé, elles permettent d'évaluer la résistance à la compression, une propriété essentielle pour déterminer la performance et la durabilité du matériau dans les ouvrages de construction.

- Éprouvettes prismatiques (7×7×28) : Les éprouvettes prismatiques de dimensions (7×7×28) cm sont des échantillons normalisés, couramment utilisés pour réaliser des essais de flexion conformément à la norme NF EN 12390-5. Lors de ces tests, une charge est appliquée en trois ou quatre points, généralement au centre ou à des emplacements précis, afin de provoquer une déformation par flexion du béton.

La quantité approximative des matériaux pour réaliser les éprouvettes en béton :

Tableau II 13 : Le volume de béton préparé pour réaliser les éprouvettes.

Type d'éprouvette	Volume de 1 seul éprouvette	Nombre d'éprouvettes	Volume total (l)
7×7×28	$1,372 \times 10^{-3}$	9	$12,348 \times 10^{-3}$
16φ32	$6,434 \times 10^{-3}$	3	$19,302 \times 10^{-3}$

II-3) Fabrication des éprouvettes en résine renforcer par des fibres :

La fabrication des éprouvettes en résine renforcée par des fibres consiste à produire des échantillons représentatifs de matériaux composites destinés à l'évaluation de leurs propriétés mécaniques.

II-3-1) Préparation des fibres :

Le choix des fibres : en a utilisé deux types des fibres selon leur propriétés et caractéristiques.

II-3-1-a) Fibres de mat de verre (fibre de verre E) :



Figure II 14 : Fibres de mat de verre.

a-1) Caractéristiques :

Tableau II 14 : Les caractéristiques de la fibre de verre E. [25]

Caractéristiques mécaniques	Verre E
La masse volumique ρ (Kg/cm ³)	2600
Diamètre ϕ (μm)	16
Rigidité : sens fibre E_f l (GPa)	74
Rigidité : sens transversal E_f t (GPa)	74
Coefficient de Poisson ν_f	0,2
Contrainte à rupture en tension σ_{fut} (MPa)	2500
Module spécifique E_f / ρ (MN/kg)	28
Contrainte spécifique σ_{fu} / ρ (kN/kg)	0,95
Coeff de dilatation thermique α_f (10 ⁻⁵ C ⁻¹)	0,3
Température limite d'utilisation T_f (C)	700
Prix (e/kg)	10

a-2) Les compositions chimiques des fibres de verre E :

Tableau II 15 : Les compositions chimiques des fibres de verre. [25]

PRINCIPAUX CONSTITUANTS	COMPOSITION MASSIQUE (%)
Silice	53à 56
Alumine	12à 16
Chaux	21à 24
Magnésie	21à 24
Oxyde de bore	5à 9
Fluor	0 à1
Oxyde de sodium	1
Oxyde de potassium	1
Oxyde de zirconium	0
Oxyde de fer	1
Oxyde de titane	1

a-3) Les propriétés:

- Résistance aux vibrations et en traction.
- Constituée de filaments très fins, tissés ou tressés selon l'usage.
- La fibre de verre E peut supporter des températures allant jusqu'à **80-105°C** en service normal.
- Excellente résistance à la plupart des produits chimiques, acides faibles, bases, et solvants.
- Excellente résistance à la plupart des produits chimiques, acides faibles, bases, et solvants.

a-4) Dimensions :

Nous avons utilisé trois dimensions différentes pour la préparation des fibres de verre : 0,5 cm, 1 cm, et 1,5 cm. Ces longueurs ont été choisies pour obtenir un mélange varié, permettant d'améliorer la répartition et la performance du matériau final.

Tableau II 16: Les dimensions de la fibre de verre

Dimension (cm)
0,5
1
1,5

a-5) Pourcentage :

Pour optimiser la composition du matériau, deux pourcentages différents ont été expérimentés lors de la préparation des fibres de verre : 1 %, et 1,5 %. Ces variations ont été sélectionnées afin d'évaluer l'impact de la concentration en fibres sur la répartition homogène et la performance mécanique du produit final.

II-3-1-b) Fibres de poil de chameau :



Figure II 15: Fibres de poil de chameau.

b-1) Caractéristiques :

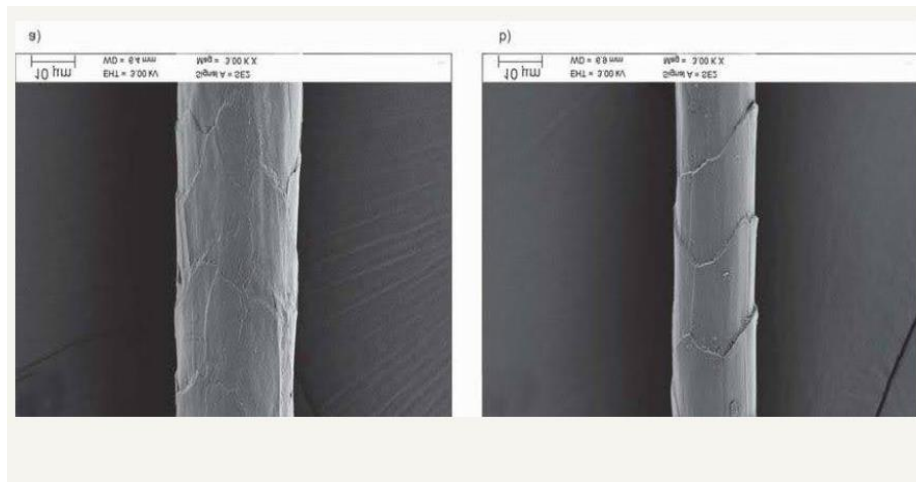


Figure II 16: Caractéristiques de la fibre de poil chameau [26].

b-2) Propriétés :

- Excellentes propriétés thermiques.
- Les fibres de poil de chameau sont résistantes et durables, assurant une utilisation longue et fiable pour divers objets.
- Une bonne capacité d'absorption de l'humidité.

b-3) Dimension :

Deux longueurs de fibres ont été sélectionnées pour la préparation : 0,5 cm et 1 cm. Ces dimensions ont été choisies afin de créer un mélange varié, ce qui permet d'améliorer la répartition des fibres dans le matériau et d'optimiser ses performances finales.

b-4) Pourcentage :

Trois pourcentages différents, à savoir 0,5 %, 1 %, et 1,5 %, ont été expérimentés lors de la préparation des fibres de poil de chameau. Ces variations ont été choisies dans le but d'évaluer comment la concentration en fibres influence la répartition homogène dans le matériau ainsi que ses propriétés mécaniques finales.

II-3-2) Préparation de la résine :

Le choix de résine un seul type de résine a été utilisée en fonction de ses propriétés et caractéristiques.

II-3-2-a) Identification :

Résine époxy (Medapoxy inject 812 EA).

Nome de durcisseur : Medapoxy inject 812/EB.

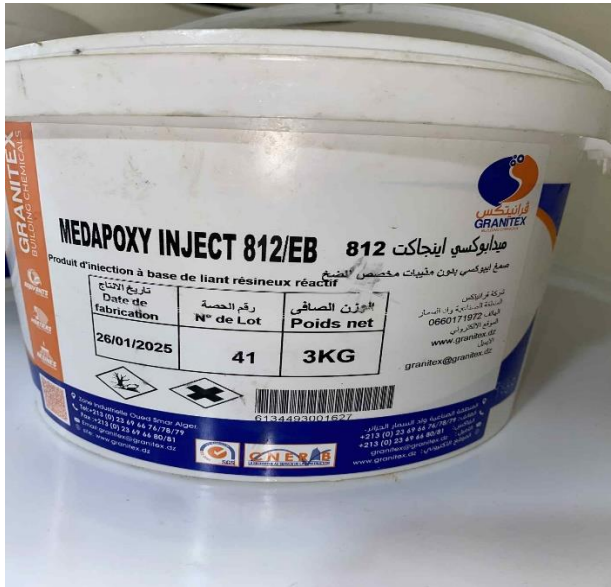


Figure II 17 : Durcisseur de la résine.



Figure II 18 : Résine époxy.

a-1) Les caractéristiques :

- Rapport pondéral (A / B) : 2/1.
- Densité (ISO758) : $1,1 \pm 0,1$.
- DPU : 30 mn à 20°C et 65% HR.
- Rc 28 (EN 12190) > 70 MPa.
- Adhérence sur béton (EN 1542,) > 3MPa.
- Durcissement complet : 07 j à 20°C Viscosité (CF4 /20°C).
- Viscosité (CF4 /20°C) : 17 sec (± 2).

a-2) Les propriétés :

- Excellente adhérence sur supports béton et mortier.
- Sans retrait au durcissement.
- Très bonnes résistances mécaniques et chimiques.

II-3-3) Élaboration des éprouvettes en résine renforcé par des fibres :

II-3-3-a) Mode opératoire :

Préparation des éprouvettes de traction de forme ban dog suivant la norme (ISO-527-2)

a-1) Dimensions suivantes :

ISO-527-2 : Plastiques — Détermination des propriétés en traction.

Partie 2 : Conditions d'essai des plastiques pour moulage et extrusion.

Tableau II 17: Les dimensions des éprouvettes de traction.

Symboles	Les différentes dimensions	Les valeurs en « mm »
l_1	Longueur de la partie étroite parallèle	80 ± 2
l_3	Longueur totale	170
R	Rayon	20-25
b_2	Largeur aux extrémités	$20 \pm 0,2$
b_1	Largeur de la partie étroite	$10 \pm 0,2$
H	Epaisseur	$4 \pm 0,2$
L_0	Longueur de référence	50 ± 0.5
L	Distance initiale entre mors	115 ± 1

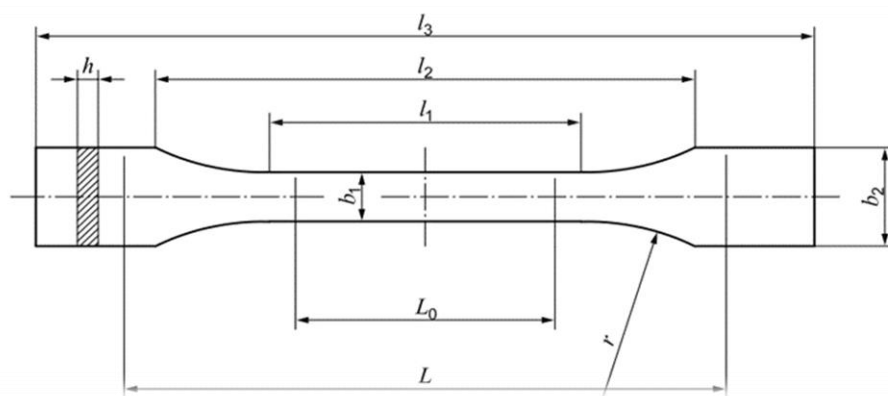


Figure II 19: Dimensions des éprouvettes de traction 527-2.



Figure II 20 : Moule des éprouvettes de forme ban dog.

a-2) Préparation de mélange :

Pour réaliser le matériau, on commence par choisir des fibres de types (poil de chameau/verre) de longueur bien définie. Ensuite, on pèse la quantité de fibres en fonction des pourcentages à tester généralement : 0,5 %, 1 %, et 1,5 % par rapport à la résine époxy et au durcisseur. Le mélange est ensuite réalisé en intégrant soigneusement les fibres à la résine et au durcisseur, en veillant à obtenir une dispersion homogène, généralement à l'aide d'un agitateur ou d'un bâton. Une fois le mélange bien homogène, il est versé dans un moule ou une forme adaptée, on laisse durcir ou polymériser le matériau selon les conditions requises : température (15 ; 35°C), temps (24h). Après durcissement, l'échantillon est démoulé, stocké dans des conditions contrôlées (80°C ; 24h), et prêt pour les tests et les analyses mécaniques. Cette méthode permet d'étudier l'impact de la longueur et de la concentration des fibres sur leur répartition dans le matériau ainsi que sur ses performances finales.



Figure II 21:Exemple des éprouvettes de résine renforcée.

a-3) Les différents variantes :

Tableau II 18 : Différents paramètres et leurs identifications.

Paramètres	Identification
Éprouvette	EP
Longueur (cm)	L
Pourcentage (%)	P
Verre E	V
Poil de chameau	Pch
Résine	R
Résine fibrée	Rf
Résine témoin	RT

- Exemple :

Éprouvette de résine avec fibres de verre de longueur 0,5cm et de pourcentage de 1% :

EP RVL0,5P1.

II-4) Préparation du montage : éprouvette en béton-plaque :

Afin de simuler et vérifier l'efficacité de traitement des fissures de béton par la résine renforcée, nous avons préparé dans cette partie d'étude, un montage composé d'une plaque de résine collée sur une éprouvette de béton.

deux variantes sont proposées :

- **1^{ère} variante** : la couche de résine est collée sur une éprouvette intacte en béton de dimensions $7 \times 7 \times 28$ en cm.
- **2^{ème} variante** : la couche de résine est collée sur une éprouvette en béton de mêmes dimensions, mais avec une ouverture de fissure de 2 mm de largeur et 4 mm de profondeur.

Concernant le renforcement, deux variantes sont considérées:

- **1^{ère} variante** : une couche de résine de 4 mm d'épaisseur et de 70 mm des deux côtés.
- **2^{ème} variante** : une couche de résine renforcée par des fibres de verre d'épaisseur 4 mm et de 70 mm des deux côtés.

La figure ci-dessous représente un schéma descriptif du montage étudié :

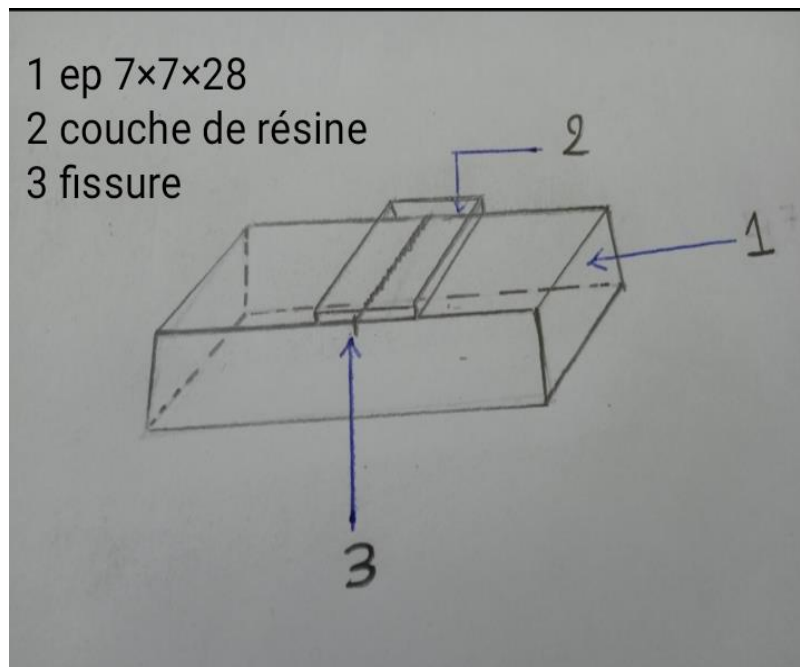


Figure II 22: Préparation du montage couple éprouvette en béton – plaque de résine renforcée.

II-4-1) Préparation des éprouvettes en béton :

- Les éprouvettes en béton de dimensions $7 \times 7 \times 28$ cm, avec l'âge 28 jours.
- L'ouverture de fissure au milieu de l'éprouvette de béton et sur le long largeur.



Figure II 23:Les éprouvettes fissurées.

- On a nettoyé les éprouvettes en béton pour assurer une bonne adhérence avec la résine.

II-4-2) Préparation de type de résine :

On a mélangé la résine et le durcisseur a des quantités nécessaires à partir au volume de la couche de résine $V_r(0,4 \times 6,2 \times 7) \text{ cm}$, le mélange a deux types :résine non renforcée et résine renforcée par des fibres de verres de 0,5cm avec 1% de la quantité de résine.

II-4-3) Application de mélange sur l'éprouvette en béton :



Figure II 24:Éprouvette de béton et résine (à l'état frais).



Figure II 25 : Éprouvettes de béton et résine (à états durci)

II-5) Techniques de caractérisation :

II-5-1) Propriétés mécaniques de résine :

Les essais mécaniques sur la résine sont essentiels pour évaluer ses propriétés structurales, notamment sa résistance à la traction.

II-5-1-a) Essai de traction :

L'essai de traction est réalisé sur des éprouvettes en résine à l'aide de la machine Zwick, permettant de déterminer la résistance maximale et le comportement en traction du matériau.



Figure II 26 : Essai de traction sur l'éprouvette en résine renforcée

II-5-2) Propriétés mécaniques du béton :

Les essais mécaniques sur le béton sont essentiels pour évaluer ses propriétés structurales, et la résistance mécanique.

II-5-2-a) Essai de compression :

Cet essai consiste à déterminer la résistance des éprouvettes de béton de dimensions (16 ϕ 32) utilisé selon la norme (12390-3) avec la presse de compression.



Figure II 27 : Essai de compression sur éprouvette de béton durci 16 ϕ 32cm.

II-5-2-b) Essai de traction par flexion : norme (12390-5)

L'essai de flexion (trois ou quatre points) consiste à soumettre une éprouvette prismatique en béton ($7 \times 7 \times 28$) à une charge pour provoquer sa déformation par flexion, permettant ainsi d'évaluer sa résistance, notamment aux contraintes de traction.

- On a effectué une série d'essai sur plusieurs types d'éprouvettes : béton-résine :

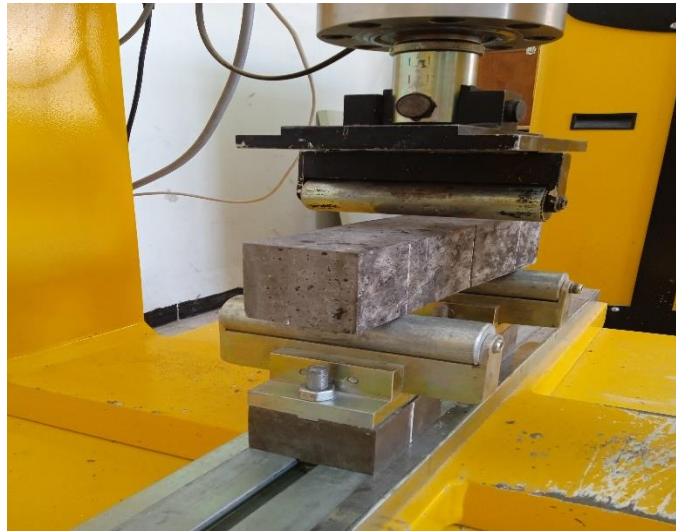


Figure II 28: Essai de flexion 3 points sur une éprouvette prismatique $7 \times 7 \times 28$ cm.

II-6) Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons passé en revue toutes les procédures et dispositifs expérimentaux utilisés dans notre travail, en passant par l'identification des matériaux, la préparation des échantillons à tester, les différentes variantes et les dimensions d'éprouvettes à étudier.

Dans le chapitre qui suit, les résultats des différentes variantes seront présentés.

CHAPITRE III
RESULTATS EXPERIMENTAUX ET
DISCUSSIONS

III-1) Introduction :

Les recherches dans le domaine du comportement mécanique des matériaux composites non renforcés ou renforcés engendre un enjeu majeur dans le domaine du génie civil et de la mécanique des matériaux, à cause de leurs diverses applications dans les différents domaines que ce soit les constructions, l'industrie automobile et même l'aéronautique. À cet effet, la performance de ces matériaux composites dépend largement de la nature, le dosage et même de la disposition des fibres de renforcement incorporées dans la matrice polymère.

Dans ce contexte, ce chapitre présente une étude expérimentale du comportement mécanique de résines renforcées par des fibres de verre et du poil de chameau, soumis à des efforts de traction. À travers la réalisation d'essais de traction, nous avons recueilli des données permettant de caractériser leurs propriétés mécaniques, telles que la résistance, la limite élastique, la ductilité et le module de Young. Cette étude vise à mettre en évidence l'impact de différents paramètres, notamment la longueur et le pourcentage des fibres, sur la performance mécanique des composites, afin d'optimiser leur conception pour des applications spécifiques.

III-2) Analyse expérimentale du comportement mécanique des matériaux soumis à des efforts de traction :

Cette partie est consacrée aux résultats des essais de traction sur plusieurs échantillons de résine renforcée soit par des fibres de verre ou bien par poiles de chameau. À travers ces essais de traction, nous avons recueilli des résultats qui permettent de caractériser ses propriétés mécaniques, telles que la résistance, la limite élastique et la déformation.



Figure III 1: Éprouvettes en résine renforcée soumises à des efforts de traction.

III-2-1) Résultats d'essai de traction :

Tableau III 1: résultats des essais de traction sur les éprouvettes de résine renforcée et non renforcée.

Type de résine	La longueur (cm)	Le pourcentage (%)	La résistance de traction σ_t (Mpa)	La déformation ϵ (%)	Module de Young (Mpa)
Résine témoin.			26,40	3,09	1294,29
Résine renforcée par fibre de verre.	0,5	1	51,86	3,65	2458,25
	0,5	1,5	50,64	3,99	2271,73
	1	1	36,02	2,06	2193,79
	1	1,5	45,09	2,42	2350,1
Résine renforcée par fibre poil de chameau.	0,5	0,5	45,84	4,80	1765,33
	0,5	1	48,16	4,46	2051,65
	0,5	1,5	47,56	4,13	2183,71
	1	0,5	49,71	4,16	2395,55
	1	1	46	5,59	1715,81
	1	1,5	42,55	2,97	2317,64

III-2-2) Comportement de l'éprouvette en résine renforcée :

Nous présentons dans cette partie d'étude, le comportement de la résine renforcée soumise à la charge de traction. Afin de distinguer l'effet de la présence de fibre sur la résistance

de la résine, nous avons présenté chaque fois la courbe de la résine témoin (sans renforcement) avec l'ensemble des courbes selon les variantes étudiées.

III-2-2-a) comportement de la résine renforcé par la fibre de verre :

Nous distinguons deux dimensions de la fibre de verre, 0,5 cm et 1 cm de longueur avec évolution des pourcentages de dosage de fibre 1% et 1,5 % pour chaque longueur.

2-2-a-1) Le cas fibre de verre de longueur 0,5 cm :

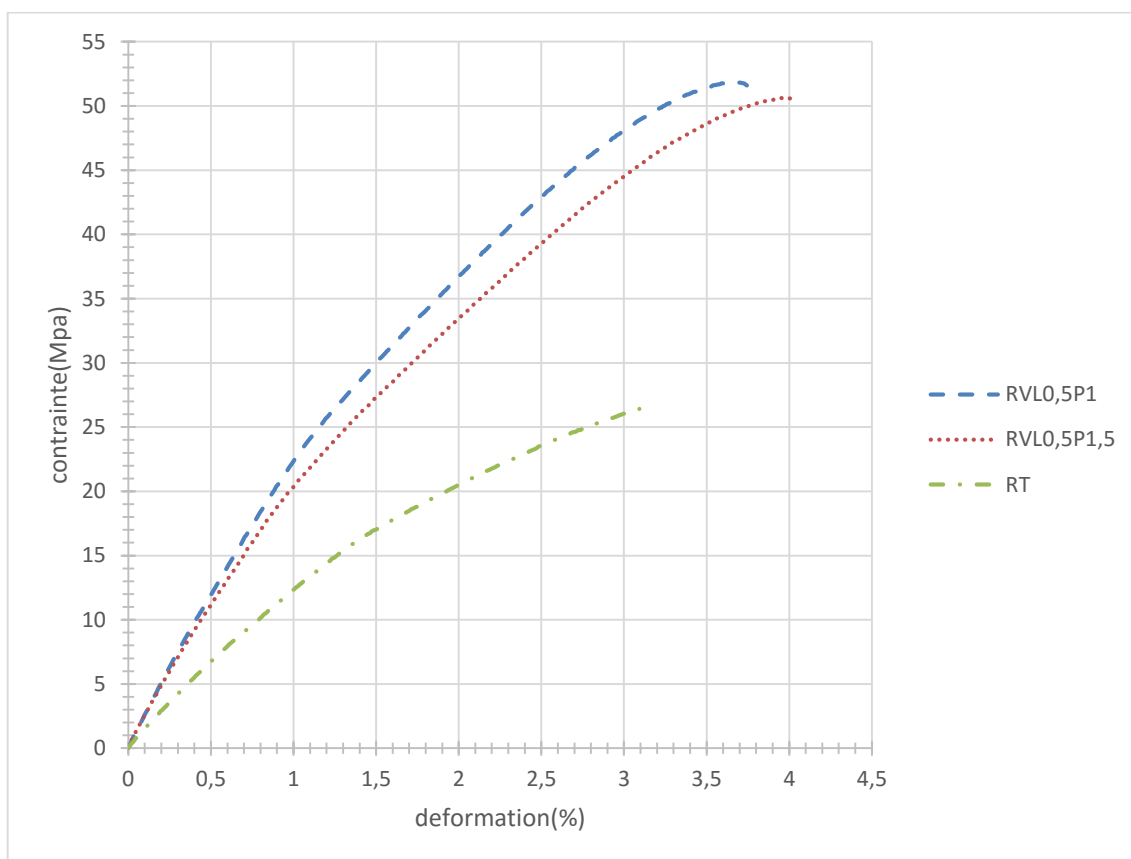


Figure III 2: Comportement de la résine renforcée par des fibres de

Verre - longueur = 0,5 cm

Le comportement global de la résine non renforcée et renforcée par la fibre de verre reste quasi-semblable selon l'évolution de l'allure de la courbe contrainte-déformation, avec des pentes différentes justifiées par la présence de la fibre ou non, ainsi que sa dimension.

Dans le cas du matériau témoin (l'éprouvette RT) nous constatons un comportement ductile, avec une limite élastique faible et une déformation plastique prolongée jusqu'à la rupture.

Dans l'autre cas où la résine renforcée par la fibre de verre, le matériau augmente sa ductilité, et sa résistance à la traction. Autrement, l'allure des deux courbes présente plusieurs pentes à la différence par rapport au témoin.

La présence de la fibre est évident et est traduit par l'augmentation de la résistance à la traction et qui peut atteindre 96 %. Cela signifie que le renforcement par des fibres de verre, la résine présente une meilleure capacité à supporter la charge avant la rupture, probablement grâce à une meilleure adhérence entre la fibre et la matrice ou à un traitement thermique plus efficace.

2-2-a-2) Le cas de fibre de verre de longueur 1cm :

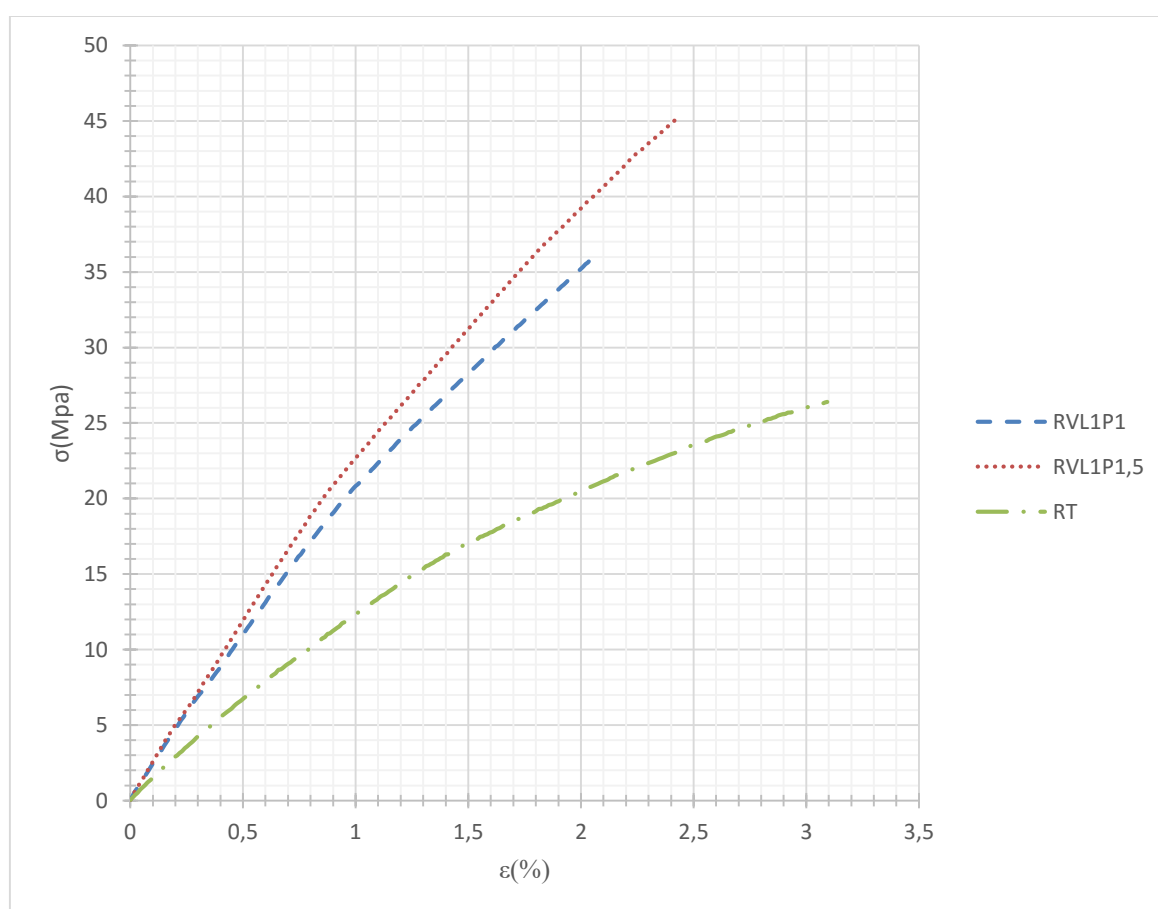


Figure III 3: Comportement de la résine renforcée par des fibres

de verre - longueur = 1 cm

Avec cette augmentation de la longueur de la fibre, on constate les mêmes conclusions précédentes avec une évolution maximale de la résistance à la traction de 80 % par rapport à la résine non renforcée.

D'après les résultats le renforcement de la matrice (résine-fibre) avec les fibres de verre de 1 cm de longueur, augmente la résistance mécanique et la rigidité, mais tend à réduire la ductilité, rendant le matériau plus cassant. Cependant, le choix du pourcentage de fibres de verre de 1cm de longueur doit ainsi équilibrer entre résistance accrue et comportement d'élasticité ou de fragilité selon l'usage prévu.

III-2-2-b) Comportement de la résine renforcée par de poil de chameau :

Dans cette partie d'étude, nous avons gardé les mêmes dimensions 0,5 cm et 1 cm de longueur de la fibre, mais avec une variation de trois pourcentages de dosage de fibres de poil de chameau 0,5 %, 1% et 1,5 % pour chaque longueur.

2-2-b-1) Le cas de fibre de de poil de chameau de longueur 0,5 cm :

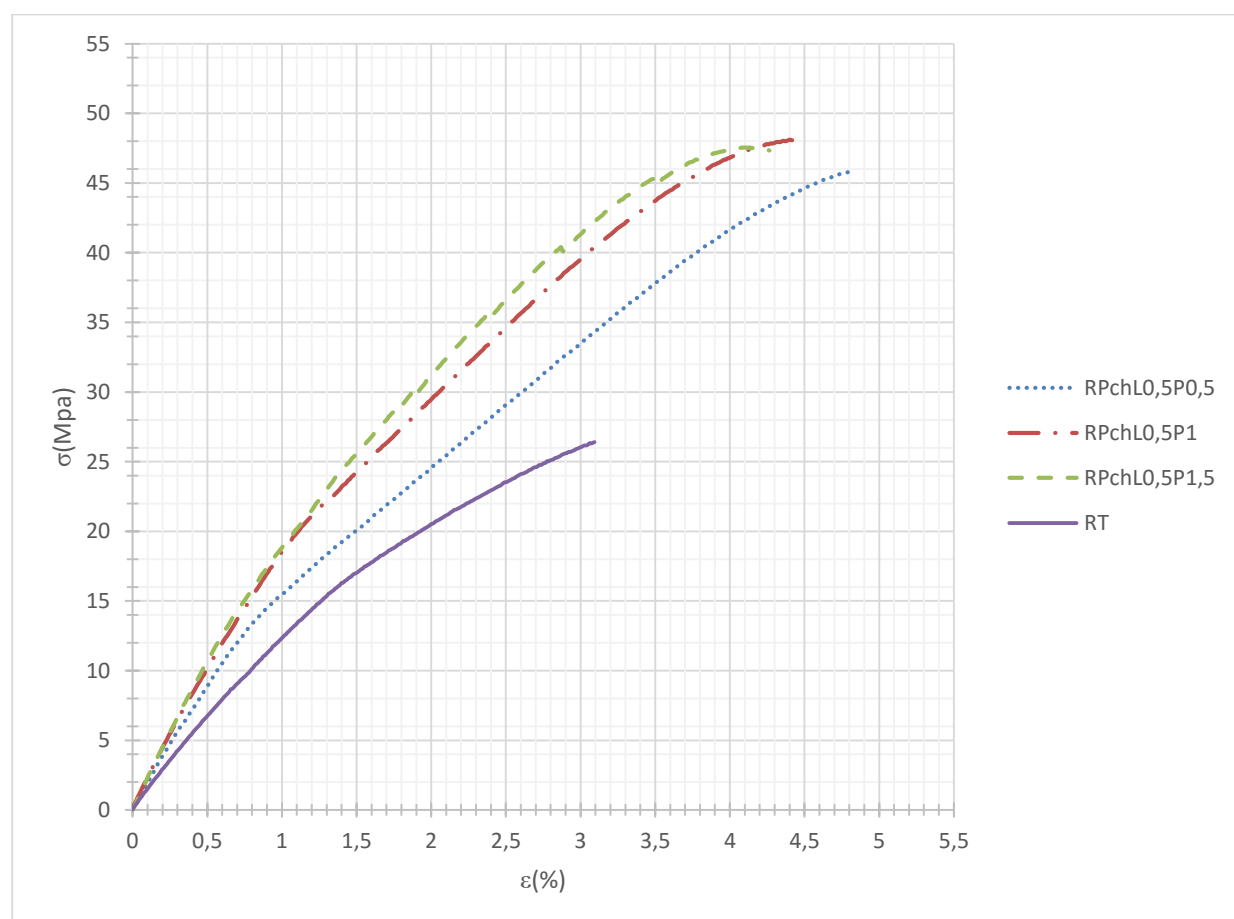


Figure III 4: Résistance à la traction des différents types de résine notamment renforcée par fibres de poil de chameau de (0,5cm)

Avec ce type de renforcement, les courbes contrainte-déformation gardent en générale la même allure, mais avec une différence par rapport au comportement soit sans renforcement ou avec renforcement par la fibre de verre. En effet, cette fois-là il apparaitre la phase élastique

plus tendue. Cela démontre l'augmentation de la phase élastique du composite. Le reste de la courbe passe par deux pentes entre la phase élasto-plastique et la fin de la phase plastique. Le prolongement remarquable de la phase plastique indique la grande ductilité de ce composite à base de fibre de poil de chameau.

L'ajout de la fibre de poil de chameau a donné une augmentation de la résistance à la traction maximale de 88.3 %.

Les courbes montrent que l'ajout de fibres de poil de chameau à la résine améliore significativement le comportement mécanique sous traction, avec une augmentation progressive de la contrainte à l'effort appliqué. La courbe renforcée avec 1 % de fibres (**RPchL0,5P1**) affiche la meilleure performance en termes de résistance ultime, en dépassant celles avec 0,5 % (**RPchL0,5P0,5**) et 1,5 % (**RPchL0,5P1,5**). La courbe de la résine non renforcée (**RT**) présente une résistance inférieure, témoignant de l'effet renforçateur des fibres. Sur le plan de l'allure, toutes les courbes suivent une phase d'élasticité initiale, caractérisée par une pente relativement constante, indiquant la rigidité du matériau, puis une phase de déformation plastique ou microfissuration progressive, jusqu'à la rupture. La résistance maximale, ou contrainte ultime, augmente avec la proportion de fibres jusqu'à atteindre un optimum à 1 %, après quoi l'efficacité du renforcement semble diminuer, probablement dû à une surcharge en fibres ou une mauvaise adhérence à des pourcentages plus élevés.

En conclusion, l'incorporation de fibres de poil de chameau de $L=0,5$ cm dans la résine améliore la résistance mécanique, la rigidité et la ductilité du matériau, avec une performance optimale à 1 % de fibres, ce qui constitue en fait une solution prometteuse pour renforcer les matériaux composites dans des applications structurales

2-2-b-2) Effet de poil de chameau de longueur de 1cm :

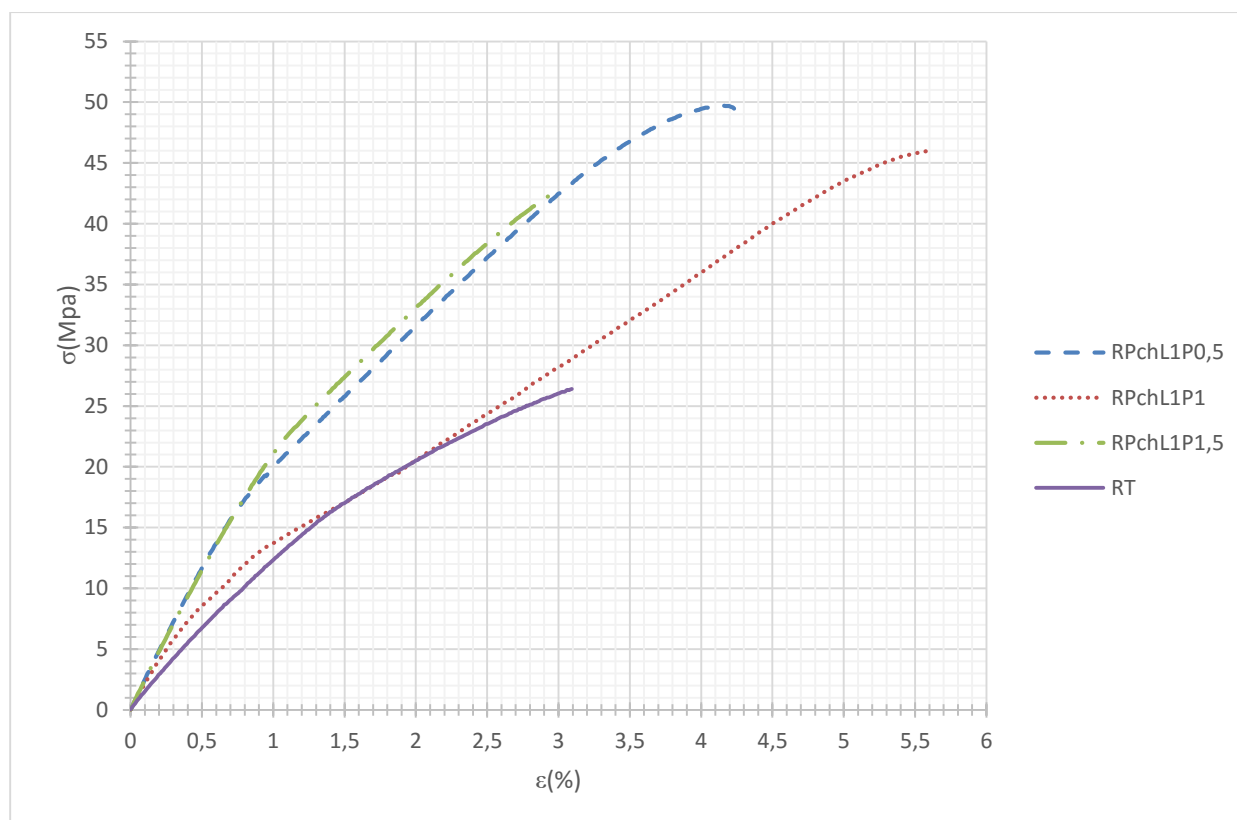


Figure III 5: Résistance à la traction des différents types de résine notamment renforcée par fibres de poil de chameau de (1cm).

L'analyse des courbes indique que l'incorporation de fibres de poil de chameau de 1 cm de longueur améliore notablement le comportement mécanique du matériau sous traction. La courbe (**RPchL1P0,5**) montre une augmentation significative de la contrainte maximale atteinte, avec une pente initiale plus raide, traduisant une meilleure rigidité. La courbe **RPchL1P1** présente la résistance ultime la plus élevée, attestant que l'ajout de 1 % de fibres optimise la performance mécanique du composite. La courbe (**RPchL1P1,5**) montre une tendance à la saturation ou à une légère baisse de la résistance, ce qui suggère qu'un excès de fibres peut engendrer des défauts d'adhérence ou une surcharge en fibres, altérant la performance. La courbe de la résine non renforcée (**RT**) affiche une résistance et une rigidité inférieures, confirmant le rôle bénéfique du renforcement en fibres. Sur l'allure, toutes les courbes montrent une phase initiale d'élasticité linéaire, suivie d'une phase de déformation progressive ou microfissuration, puis de rupture. L'augmentation de la proportion de fibres à 1 % semble optimiser la capacité de charge, tandis qu'un pourcentage supérieur pourrait provoquer une diminution de la performance, en raison d'une surcharge ou d'un mauvais mouillage des fibres.

En conclusion, l'effet du poil de chameau de 1 cm de longueur est bénéfique pour renforcer la résistance à la traction, avec un pourcentage optimal autour de 1 %, ce qui offre une perspective intéressante pour le développement de matériaux composites renforcés dans le domaine du génie civil.

III-2-3) La contrainte maximale pour chaque type de résine renforcée :

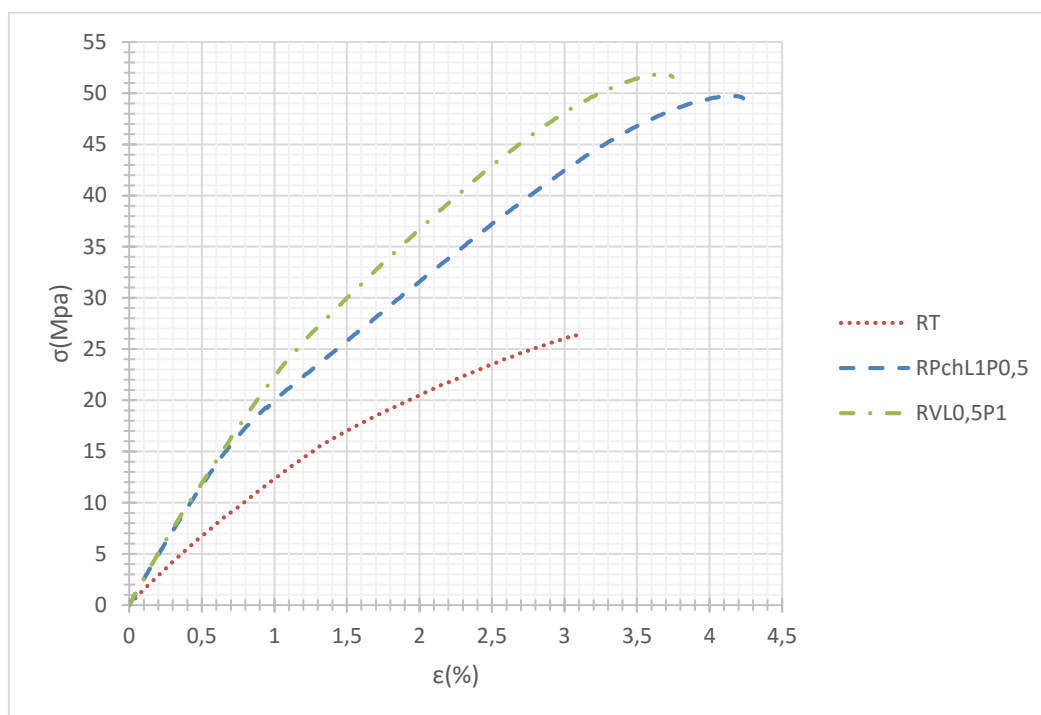


Figure III 6: Contraintes maximales pour chaque type de résine.

Impact du renforcement sur la résistance mécanique :

L'analyse des courbes montre clairement que le renforcement de la résine par des fibres, qu'elles soient de poil de chameau ou de verre, augmente significativement la limite maximale de contrainte (σ) que le matériau peut supporter avant rupture. La résine non renforcée (RT) présente la contrainte maximale la plus faible, environ 25 MPa, témoignant de sa faiblesse intrinsèque sans renforcement.

Effet du type de fibre de renforcement :

La résine renforcée par des fibres de verre (RVL0,5P1) atteint une contrainte maximale supérieure à celle renforcée par des fibres de poil de chameau (RPchL1P0,5).

La fibre de verre, grâce à ses propriétés mécaniques supérieures, confère une meilleure résistance à la traction, illustrée par une valeur maximale avoisinant 50 MPa, soit une augmentation de près de 100 % par rapport à la résine non renforcée.

La fibre de poil de chameau offre une augmentation plus modérée de la résistance. Les résultats montrent que la nature et la rigidité de la fibre jouent un rôle crucial dans l'efficacité du renforcement.

III-3) effet de la longueur et du pourcentage des fibres sur la résistance de résine :

III-3-1) Effet longueur / pourcentage sur la résistance:

III-3-1-a) Effet de la longueur sur la résistance:

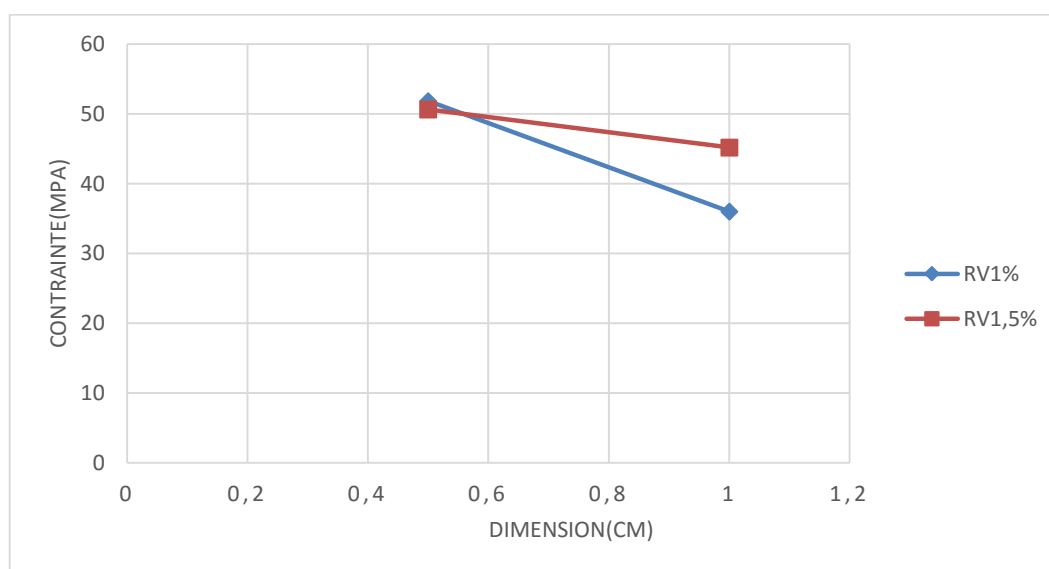


Figure III 7: Effet de la longueur sur la résistance du composite en fibres de verre.

Cas de renforcement de 1 % (RV1%)

La résistance à la contrainte diminue significativement lorsque la dimension (en cm) augmente.

À une petite dimension, la résistance est d'environ 51,86 MPa.

À une dimension de 1 cm, la résistance chute à environ 36,02 MPa.

Cela montre que l'augmentation de la dimension réduit la capacité de résistance de la résine renforcée.

Cas de renforcement de 1,5 % (RV1,5%) :

La résistance reste relativement stable autour de 50 MPa pour des dimensions faibles. Lorsqu'on atteint une dimension proche de 1 cm, la résistance diminue légèrement, mais reste plus élevée que celle de **RV1%** pour la même dimension.

III-3-1-b) Effet de pourcentage sur la résistance de renfort avec fibres de verre :

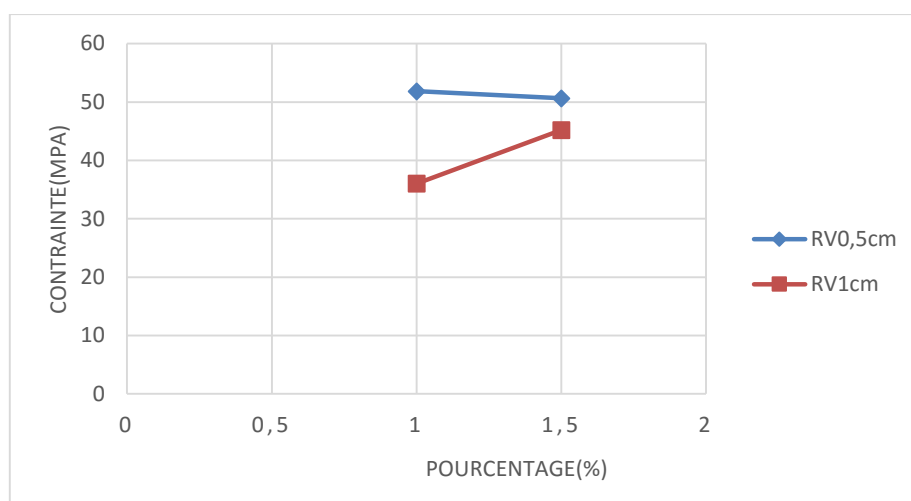


Figure III 8: Effet de pourcentage sur la résistance de renfort avec fibres de verre.

Cas de renforcement avec des fibres de longueur de 0,5 cm (RV0,5cm) :

La résistance est plus élevée à **1%** de fibres, atteignant environ **52 MPa**. Lorsqu'on augmente la proportion de fibres à 1,5 %, la résistance diminue légèrement, à environ **50 MPa**.

À 0,5 %, la résistance est donc maximale pour ce cas, mais l'augmentation du pourcentage ne permet pas d'améliorer la résistance dans cette configuration.

Cas de renforcement avec des fibres de longueur de 1 cm (RV1cm) :

La résistance à 1 % de fibres est d'environ **37 MPa**.

À 1,5 %, la résistance augmente à environ **44 MPa**.

Cela indique qu'une augmentation du pourcentage de fibres de 1 % à 1,5 % améliore significativement la résistance pour cette longueur.

III-3-2) Effet longueur / pourcentage sur la résistance : cas de fibres poil de chameau

III-3-2-a) Effet de la longueur sur la résistance : cas de fibres poil de chameau

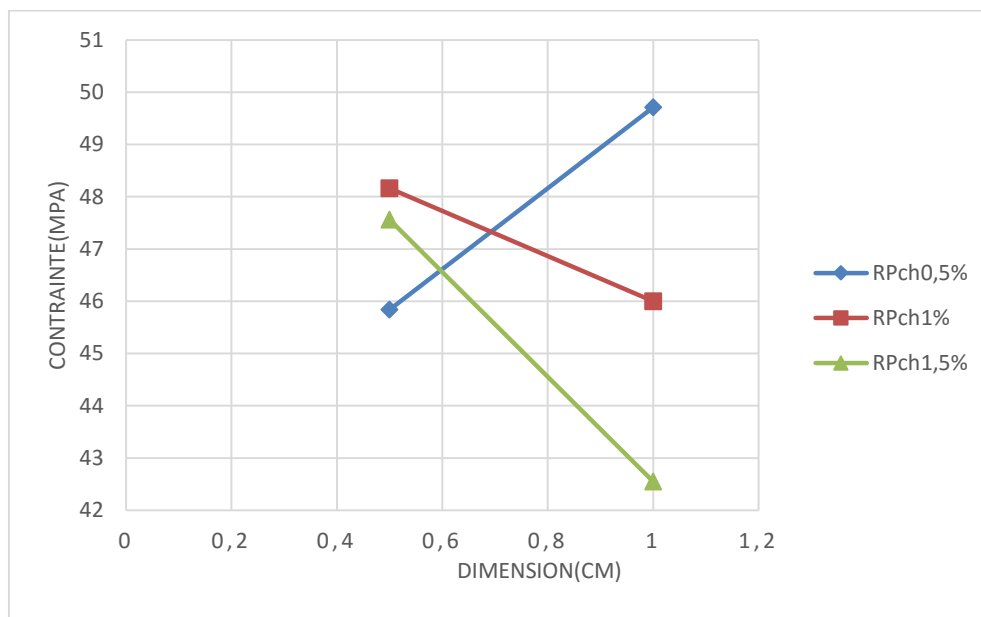


Figure III 9: Effet de la longueur sur la résistance : cas de fibres poil de chameau

La courbe illustre l'effet de la longueur des fibres de poil de chameau sur la résistance à la traction (MPa) pour trois proportions différentes de fibres dans composite 0,5%, 1%, et 1,5%.

Pour la composition **RPch 0,5 %** La résistance augmente avec la dimension : elle passe d'environ 45 MPa à 0,5 cm à près de 50 MPa à 1 cm.

Cela indique que pour cette proportion de fibres, la résistance est meilleure avec des dimensions plus grandes.

Pour la composition **RPch 1 %** La résistance diminue avec la croissance de la dimension: elle chute d'environ 48 MPa à 0,5 cm à environ 46 MPa à 1 cm.

Pour la composition **RPch 1,5%** La résistance diminue fortement avec la longueur. Elle chute de 47,5 MPa à 0,5 cm à environ 42,5 MPa à 1cm .

La tendance montre une baisse de la résistance avec l'augmentation de la dimension.

L'effet de la longueur des fibres sur la résistance dépend de la proportion de fibres dans le composite. À 0,5 %, augmenter la longueur améliore la résistance, tandis qu'à 1 % et 1,5 %, cela semble réduire la résistance, probablement en raison de phénomènes comme l'agglomération ou la mauvaise distribution des fibres longues à ces proportions.

III-3-2-b) Effet de pourcentage sur la résistance : cas de fibres poil de chameau

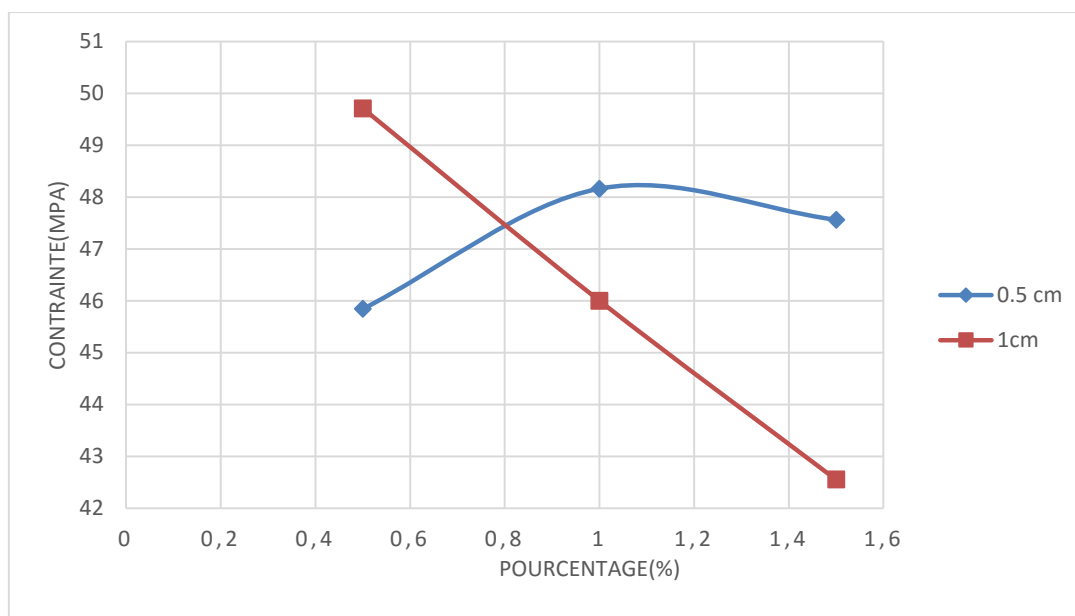


Figure III 10: Effet de pourcentage sur la résistance : cas de fibres poil de chameau

Pour 0,5 cm de la longueur, l'effet du pourcentage est modéré. La résistance augmente légèrement puis diminue.

Pour 1 cm de la longueur, la résistance diminue nettement avec l'augmentation du pourcentage de fibres.

L'effet global indique qu'une faible pourcentage de fibres (autour de 0,5 %) améliore la résistance.

Au-delà de 0,5 %, l'augmentation du pourcentage de fibres peut réduire la résistance, surtout pour l'épaisseur de 1 cm.

Conclusion :

L'ajout de fibres de poil de chameau a un effet optimal à un pourcentage modéré (~0,5 %) pour maximiser la résistance.

Une augmentation du pourcentage de fibres au-delà de cette valeur tend à diminuer la résistance, particulièrement pour des pièces épaisses (1 cm). La relation n'est pas linéaire : il faut optimiser le pourcentage pour obtenir la meilleure performance mécanique selon la longueur.

III-4) Confrontation en considérant les dimensions maximales :

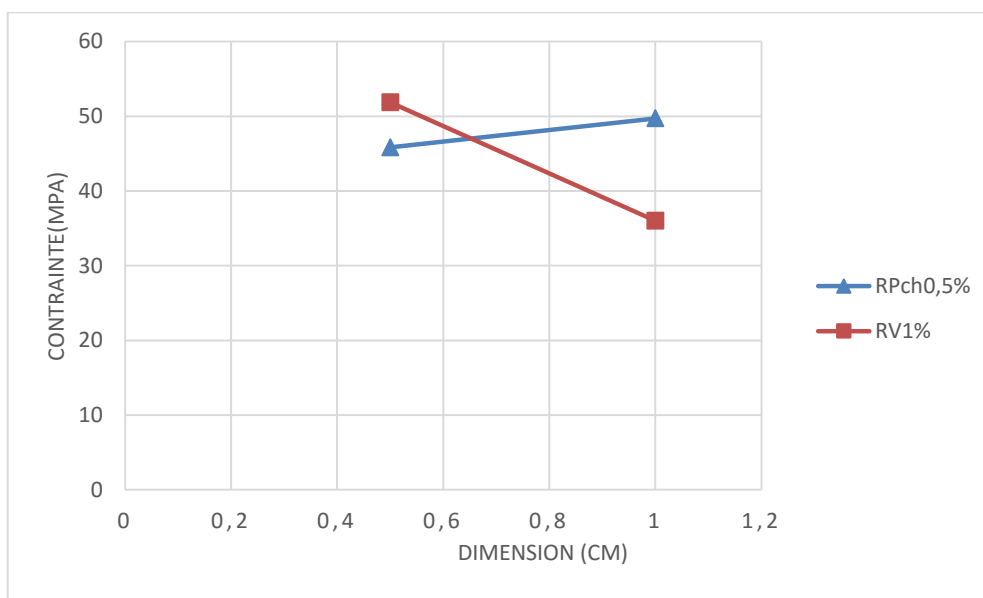


Figure III 11: Confrontation pour les différentes longueurs.

Le matériau renforcé avec poils de chameau (RPch0,5%) offre une meilleure stabilité mécanique, tandis que celui renforcé avec fibres de verre à 1% (RV1%) présente une résistance accrue à court terme mais peut diminuer avec l'augmentation de la taille.

III-5) Confrontation en considérant les pourcentages maximum :

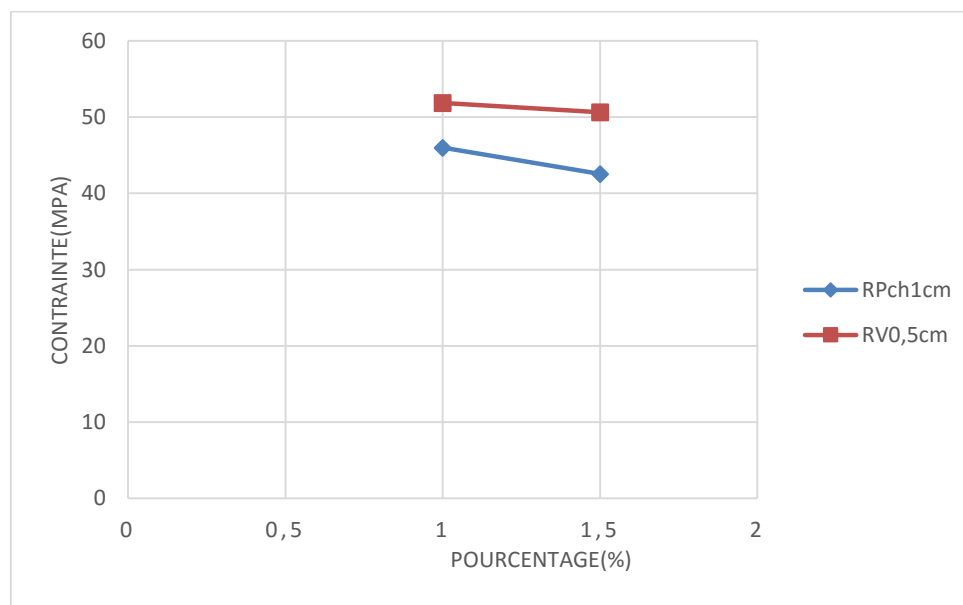


Figure III 12: Confrontation pour les différents pourcentages.

la fibre de verre (RV0,5cm) peut offrir une résistance maximale dans ce contexte, car ses propriétés mécaniques (résistance à la traction et rigidité) sont supérieures à celles du poil

de chameau. La longueur de 0,5 cm pour la fibre de verre permet une meilleure adhérence et distribution des efforts, ce qui augmente la résistance globale. Le poil de chameau, bien que naturel, a des propriétés mécaniques inférieures, donc la fibre de verre offre une résistance maximale dans ce cas.

En conclusion, la fibre de verre à 0,5 cm offre une résistance mécanique maximale à court terme grâce à ses propriétés supérieures, tandis que le poil de chameau à 0,5 % assure une meilleure stabilité mécanique sur le long terme. Le choix dépend donc des besoins spécifiques du projet, entre résistance immédiate et durabilité.

III-6) Essai sur les éprouvettes en béton :

III-6-1) Résultats d'essai de compression sur les éprouvettes 16 ϕ 32 cm :

Tableau III 2 : Résultats d'essai de compression.

Identification	La force (KN)	La contrainte (MPa)
E1.16 ϕ 32	935,5	46,5
E2.16 ϕ 32	843,4	41,9
E3.16 ϕ 32	799,2	39,7

III-6-2) Résultats d'essai de traction par flexion sur les éprouvettes 7 \times 7 \times 28cm :

Tableau III 3 : Résultats d'essai de traction par flexion.

Identification	Masse (Kg)	FORCE (KN)	LA CONTRAINT (MPa)	Type d'éprouvette
BIR	3,375	13,1	2,3	Béton intact renforcé avec résine
BI	3,235	9,9	1,2	Béton intact
BFR	3,380	6,4	1,3	Béton fissuré renforcé avec résine
BF	3,371	3,9	0,5	Béton fissuré.

III-6-2-2) La force maximale appliqué :

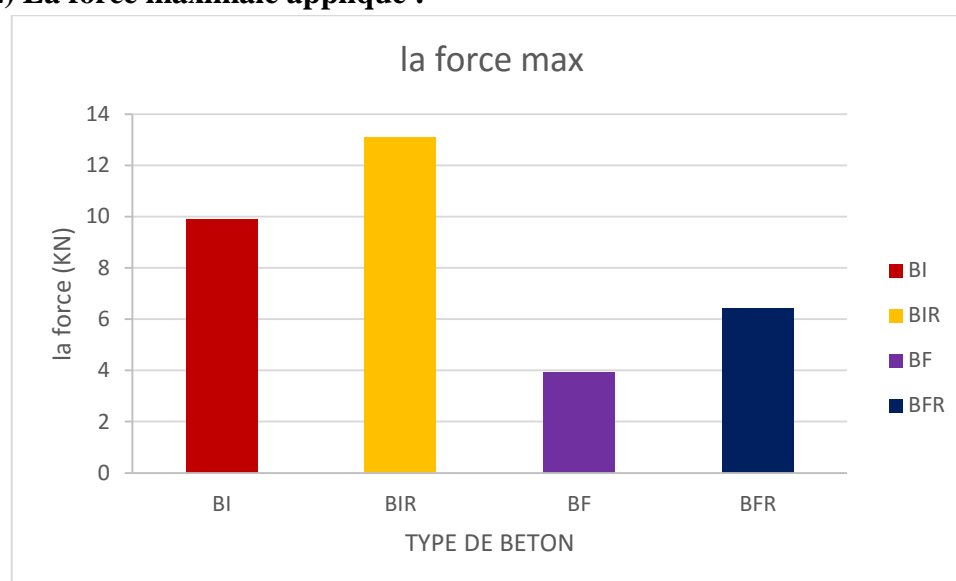


Figure III 13 : les forces appliquées sur les éprouvettes.

BI (Béton Intact) : La force maximale est d'environ (9,9kN), ce qui indique la capacité du béton sans aucune altération ou dégradation.

BIR (Béton Intact renforcé par Résine) : La force maximale atteint environ 13 kN, montrant une augmentation significative de la résistance grâce au renforcement par la résine renforcée.

BF (Béton Fissuré) : La résistance chute à environ (3,9 kN), ce qui reflète la faiblesse du béton après fissuration.

BFR (Béton Fissuré renforcé par Résine) : La force maximale est d'environ 6,4 kN, ce qui indique que le renforcement par résine permet de récupérer une partie de la résistance perdue suite à la fissuration.

A partir de ces résultats on peut dit que Le renforcement par résine (Béton + Plaque **RVL0,5P1**) est efficace pour restaurer la résistance du béton fissuré, ce qui est essentiel pour la réparation et la durabilité des structures en béton.

III-6-2-3) La contrainte maximale pour chaque éprouvette :

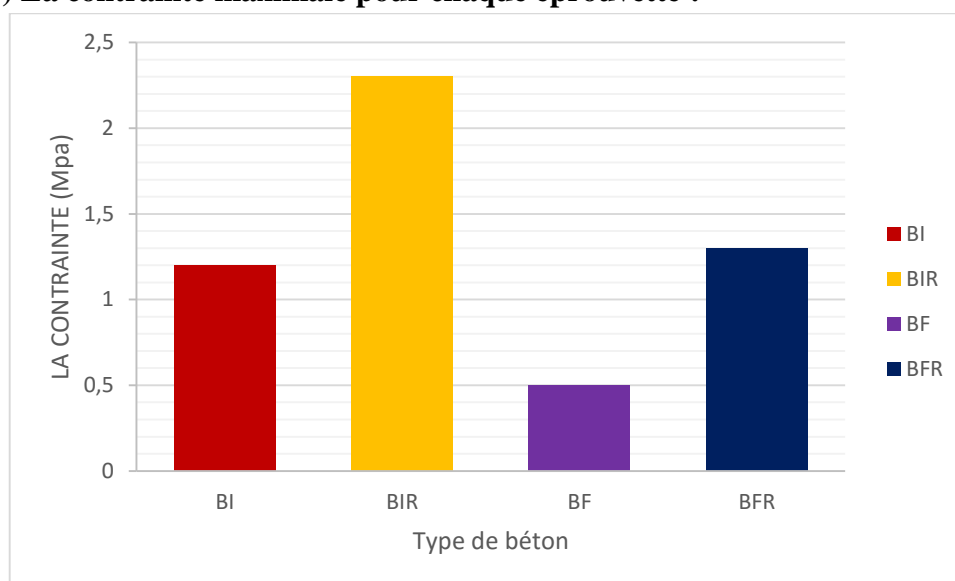


Figure III 14 : Valeurs de la contrainte maximale pour chaque type de béton.

Les résultats de la flexion de la poutre, montrent l'efficacité de renforcement avec une résine chargée, de telle sorte que le renforcement d'un béton intact a augmenté la résistance de 91,66%. Cependant, dans le cas d'un béton fissuré renforcé par la résine chargée, la résistance a augmenté jusqu'à 160 %. De plus nous avons constaté qu'avec le renforcement par la résine chargée, nous pouvons même récupérer la totalité de la résistance initiale.

Finalement, ces résultats montrent que l'utilisation de résine époxy à base de fibre, reste une solution efficace pour traitement de béton fissuré.

III-7) Conclusion :

Les essais de traction, et l'étude du comportement globale de la résine vis-à-vis la résistance, la déformation, et le module d'élasticité par un renforcement à base de fibre de verre ou par fibre de poil de chameau ont mis en évidence l'intérêt du renforcement de la résine par des fibres. Les améliorations dépendent de la nature de la fibre, sa dimension et son pourcentage par rapport à la matrice de résine. Concernant la meilleure variante de renforcement par la fibre de verre est celle de dimensions 0,5 cm et 1 % de dosage. En revanche, le meilleur renforcement par la fibre de poil de chameau est de 1 cm de longueur avec 0,5% de dosage.

En comparant le renforcement des deux fibres, la fibre de verre donne de meilleures résistances à la traction par rapport à celle du poil de chameau. Par contre, ce dernier améliore plus la phase élastique du matériau et plus ductile.

Finalement, les résultats montrent aussi l'efficacité de l'utilisation de la résine chargée pour le traitement des fissures de béton avec une amélioration la résistance qui peut atteindre les 160%.

CHAPITRE IV
SIMULATION NUMERIQUE

IV-1) Introduction :

L'objectif d'une modélisation numérique est de représenter un problème physique, de l'examiner afin d'identifier une solution et de faciliter la conception des structures. Elle facilite la formulation d'un problème dans un langage adapté à l'informatique. Elle considère tous les facteurs susceptibles d'affecter le problème à analyser.

Ce chapitre expose les résultats obtenus grâce à la modélisation numérique dans un contexte théorique de calculs numériques des structures en béton, partiellement renforcées par des plaques composites, sous un chargement de flexion. La deuxième partie se focalise sur la présentation et l'examen des résultats obtenus en termes de contraintes, déformations et modes de rupture. Ces derniers sont exposés et discutés à travers des diagrammes et des cartographies illustrant l'évolution des dommages, afin de souligner l'intérêt de la méthode suggérée par rapport aux poutres de référence. L'objectif principal est de mettre en évidence la longueur optimale de la plaque de renforcement vis-à-vis d'un chargement de flexion.

IV-2) Présentation succincte du logiciel Abaqus :

Abaqus, développé en 1978, est une suite de programmes puissants de simulation qui repose sur la technologie des éléments finis. Il est capable de résoudre des problèmes allant des analyses linéaires relativement simples aux simulations non linéaires les plus complexes. Il est conçu pour résoudre des problèmes liés au Génie Civil et à d'autres domaines. Abaqus comprend une large collection d'éléments capables de représenter presque toutes les géométries.

ABAQUS se divise en trois grands codes :

- ABAQUS/Standard : résolution par un algorithme statique implicite.
- ABAQUS/Explicit : résolution par un algorithme dynamique explicite.
- ABAQUS/CAE : fournit un environnement complet de modéliser et de visualisation pour des produits d'analyse d'ABAQUS.

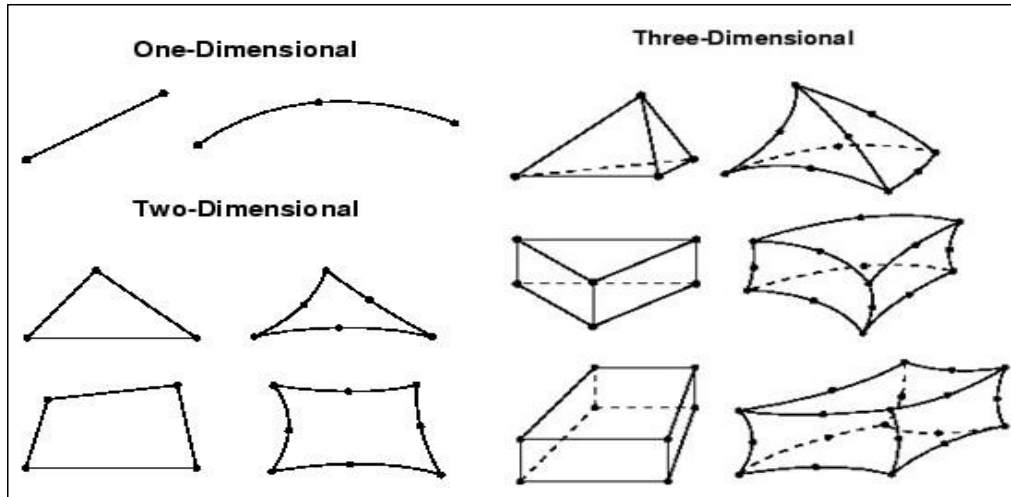


Figure IV 1 : Éléments finis utilisés pour la discrétisation des formes complexes.

IV-3) Un modèle pour le béton :

Le béton est un matériau classé comme quasi-fragile ; pour des charges modérées, il demeure dans la zone élastique, ce qui signifie que les déformations proviennent de déplacements quasi-réversibles d'atomes. Pour des sollicitations plus élevées, la rupture se produit rapidement, ce qui témoigne de la fragilité de ce matériau.

Le modèle béton « Damaged plasticity model for concrete and other quasi-brittle materials » est conçu pour traiter les enjeux de plasticité associés à l'endommagement du béton non-visqueux.

IV-4) Relation contrainte-déformation

La relation contrainte-déformation est définie par :

$$\sigma = (1 - d)D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) = D^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \dots \dots \dots (IV.)$$

D_0^{el} : la matrice de raideur élastique.

$D^{el} = (1 - d)D_0^{el}$: représente la matrice de raideur après endommagement.

$\bar{\sigma}$: Le tenseur de contrainte effective.

L'utilisation du principe de la contrainte effective conduit à une relation liant la contrainte réelle à la contrainte effective donnée par : $\bar{\sigma} = (1 - d)\bar{\sigma}$; ce qui nous permet de relier le tenseur de contrainte effective au tenseur de contrainte élastique par la formule suivante :

$$\bar{\sigma} = D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \dots \dots \dots (IV)$$

Un unique paramètre scalaire d'endommagement affectant le module de Young représente le niveau de détérioration du matériau sous une charge externe.

IV-5) Loi d'écrouissage

On suppose que le matériau s'écrouit de manière isotrope et que l'évolution de la surface de charge est dirigée par une unique variable scalaire : la déformation plastique cumulative $\tilde{\varepsilon}^{pl}$.

L'écrouissage isotrope se réfère à une expansion directe du critère initial, comme illustré dans le diagramme ci-dessous. Ceci illustre une courbe de contrainte-déformation plastique en traction-compression ainsi que sa représentation dans l'espace des contraintes.

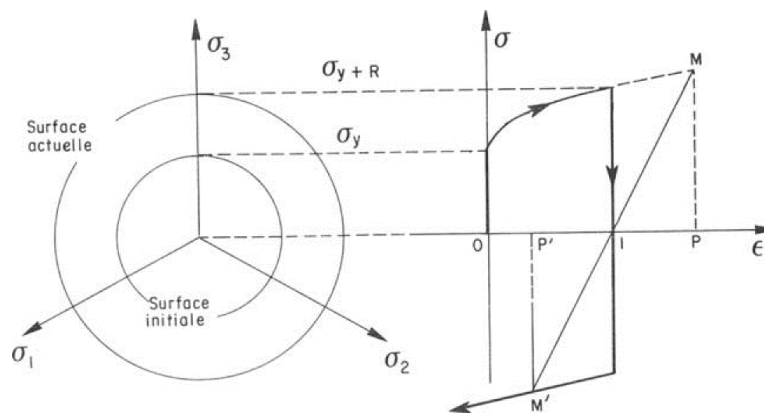


Figure IV 2 : Écrouissage isotrope.

Pour la compression uniaxiale, la réaction est linéaire jusqu'à atteindre la limite élastique. Dans le domaine plastique, elle est généralement marquée par un écrouissage suivi d'un adoucissement, au-delà de la contrainte de rupture.

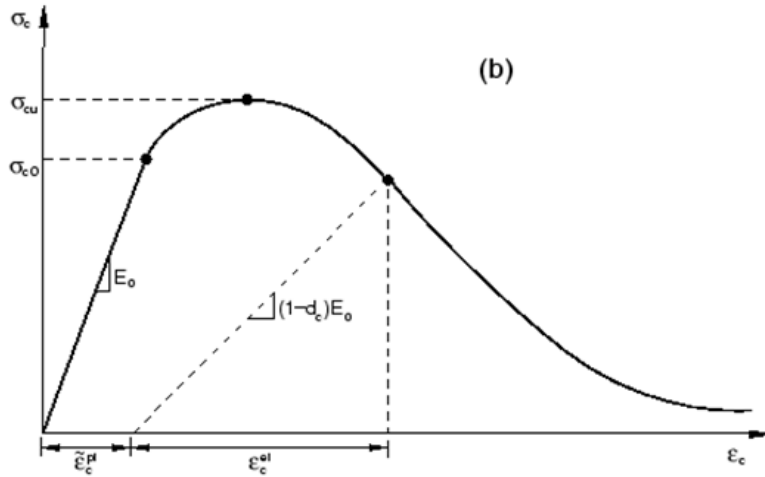


Figure IV 3: Réponse du modèle à la compression simple.

Comme l'illustrent ces graphiques, lorsque l'échantillon de béton est libéré de tout point de l'adoucissement, la rigidité élastique du matériau se dégrade ou se détériore. Cette détérioration de la rigidité est définie par deux paramètres d'endommagement qui dépendent des déformations plastiques et de la température, et ils sont préétablis comme suit :

$$d_t = d_t(\tilde{\varepsilon}_t^{pl}, \theta, f_i), \quad (0 \leq d_t \leq 1)$$

$$d_c = d_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}, \theta, f_i), \quad (0 \leq d_c \leq 1) \dots \dots \dots (IV)$$

Les variables de dégradation peuvent avoir des valeurs de 0, indiquant un matériau intact (rigidité initiale), et de 1, symbolisant la dégradation complète du matériau (une disparition totale de sa rigidité).

Dans le contexte de la rigidité élastique du matériau, les relations de contraintes et de déformations lors d'une traction et compression simple sont, respectivement ::

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl})$$

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \dots \dots \dots (IV)$$

Les contraintes effectives de traction et de compression sont , respectivement :

$$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{(1 - d_t)} = E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl})$$

$$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{(1-d_c)} = E_0(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \dots \dots \dots (IV)$$

VI- 6) Modèle élastique-orthotrope pour les composites

Les composites orthotropes sont des matériaux composites dont le renforcement est généralement formé de fils unidirectionnels croisés à 90° : certains dans la direction de la chaîne, d'autres dans la direction de la trame, comme le révèle la figure. Ces strates disposent de trois plans de symétrie orthogonale, par paires, et se comportent de manière élastique en tant que matériau orthotrope. Dans notre situation, nous avons employé un mat de fibres de verre E courtes.

Le comportement d'un matériau orthotrope est expliqué en intégrant la matrice de rigidité dans la loi de Hooke. C_{ij} ou la matrice de souplesse S_{ij}

La matrice de rigidité s'écrit, après simplification due à la symétrie par rapport à trois plans de symétrie, comme suit :

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

Pour d'évaluer la solidité du GFRP, qui se réfère à une détérioration irréversible du matériau, on utilise les critères de rupture de Hill-Tsai, tenant compte des observations expérimentales. Ce critère est appliqué aux composites à fibres continues unidirectionnelles et postule que le point où $\sigma_{11} = \sigma_{22} = Y, \sigma_{12} = 0$ se situe sur la surface de rupture. La destruction du matériau se produit lorsque les contraintes normales $\sigma_{11}\sigma_{22}$ atteignent la tension ultime transversale Y. Selon la relation (IV.), l'état limite de contraintes n'est pas atteint tant que l'inégalité est respectée :

$$\left(\frac{\sigma_L}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{Y}\right)^2 - \frac{\sigma_L \sigma_T}{X^2} + \left(\frac{\sigma_{LT}}{X_{LT}}\right)^2 = 1$$

VI-7) Présentation des modèles :

Le renforcement des poutres proposé consiste à placer sous la sous face de la poutre des plaques composites pour une meilleure reprise du moment fléchissant. Différentes longueurs de la plaque ont été considérées dans le but d'optimiser les dimensions de la plaque.

La poutre est soumise à un chargement de flexion 3-points. Trois longueurs de la plaque de renforcement ont été considérées : $L_p = 6,2$ cm, $L_p = 12,4$ cm et $L_p = 18,6$ cm.

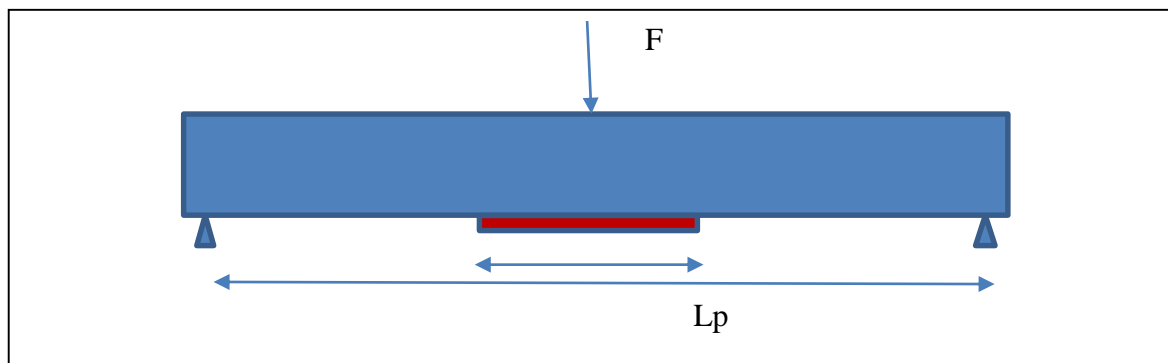


Figure IV 4: Poutre renforcée.

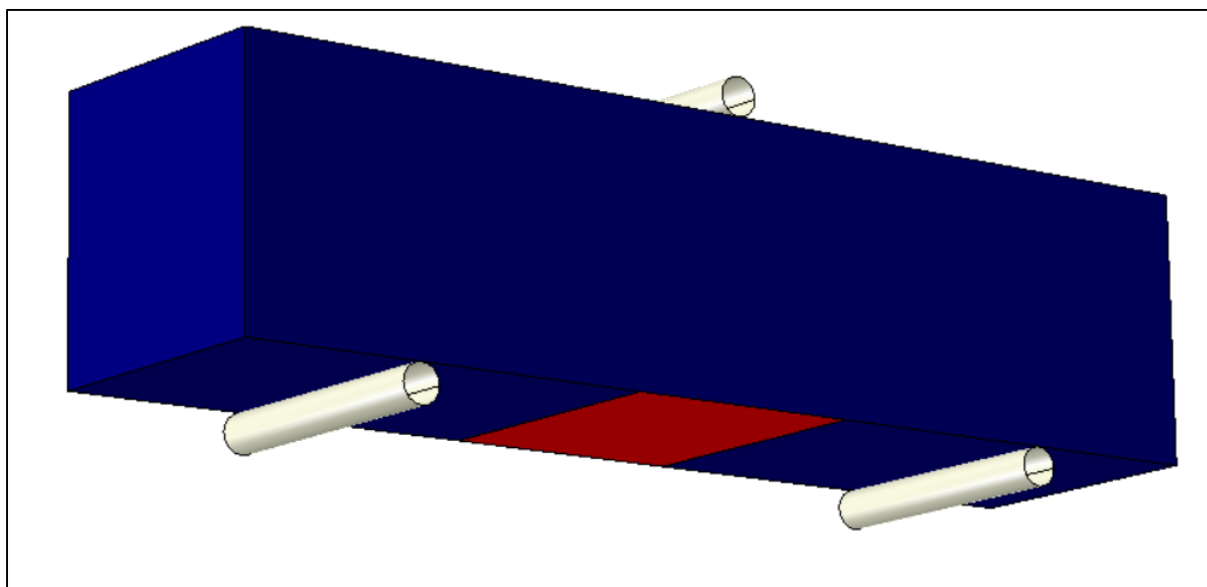


Figure IV 5: Mode de chargement de la Poutre.

IV-8) Présentation des résultats et discussion

Les figures suivantes illustrent les résultats de la simulation numérique concernant l'évolution de l'endommagement, des déformations et des contraintes. Elles montrent aussi la diminution de la rigidité lors des simulations des poutres témoins, ainsi que des poutres classiques et confinées équipées de barres inclinées jusqu'à la rupture sous l'effet d'une charge externe appliquée.

IV-8-1) Poutre de référence P-Ref

La courbe force – déplacement de la poutre en béton (Poutre de référence) est donnée par la figure IV. On remarque un comportement fragile dû à l'absence du ferrailage. La valeur maximale de la force $F_{max} = 12,8$ KN et le déplacement correspondant au pic de la force est de 0,036

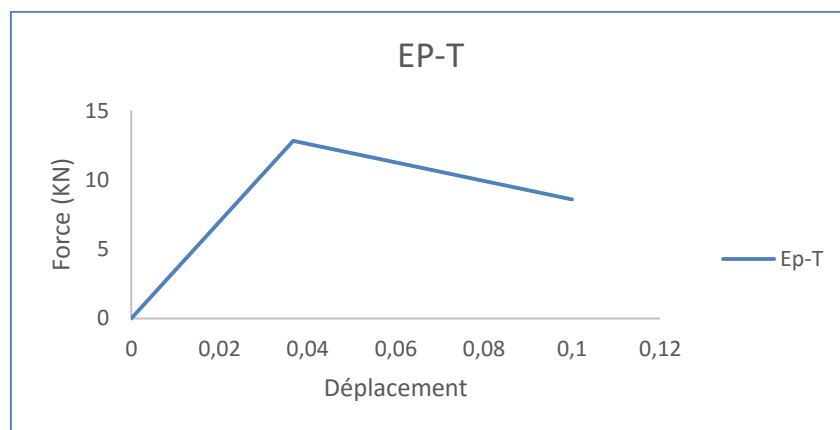


Figure IV 6 : Courbe Force – déplacement de la poutre de référence P-Ref.

IV-8-2) Poutre renforcée : Cas de 6.2cm :

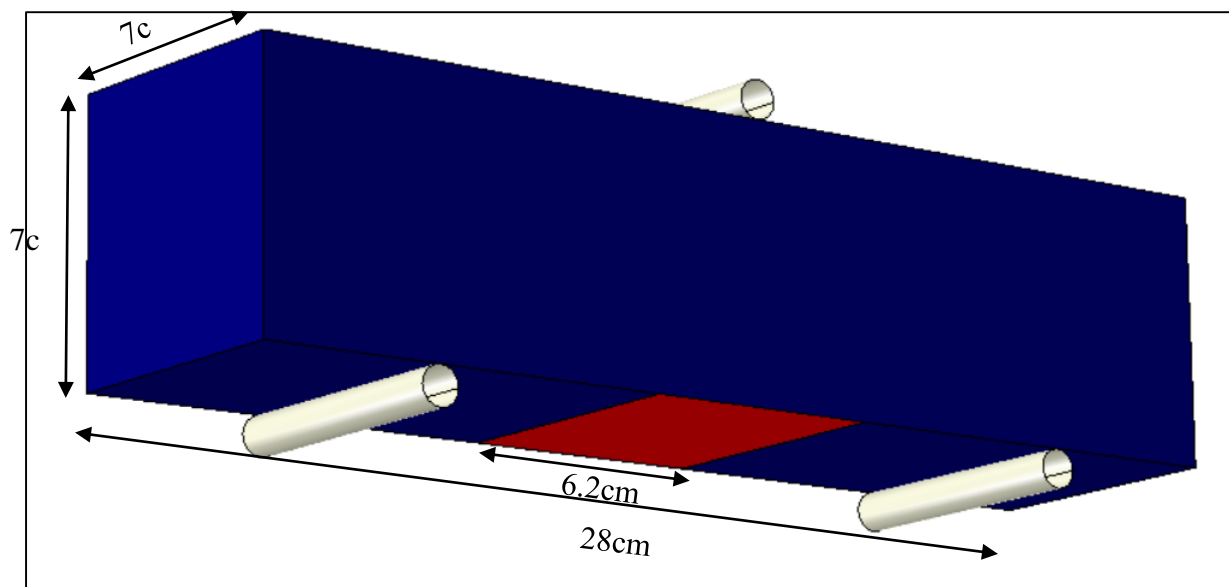


Figure IV 7 : Mode de chargement de la poutre renforcée par une plaque de 6,2 cm de longueur.

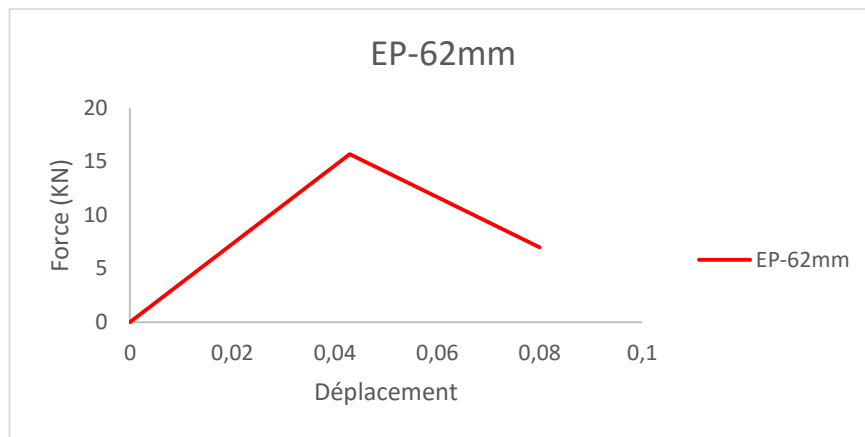


Figure IV 8 : Courbe Force – déplacement de la poutre avec plaque composite $L_p = 6,2$ cm

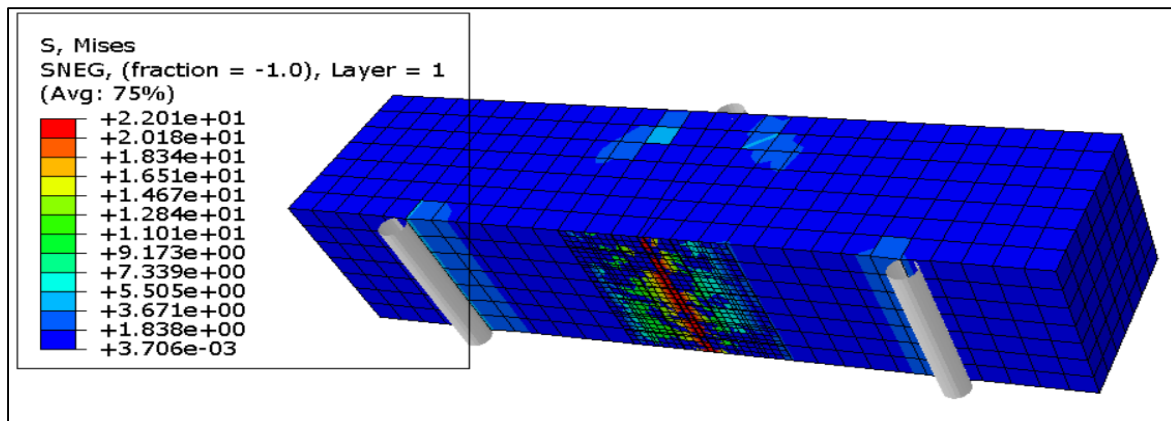


Figure IV 9: Évolution des contraintes dans la variante 1 $e = 6.2$ cm.

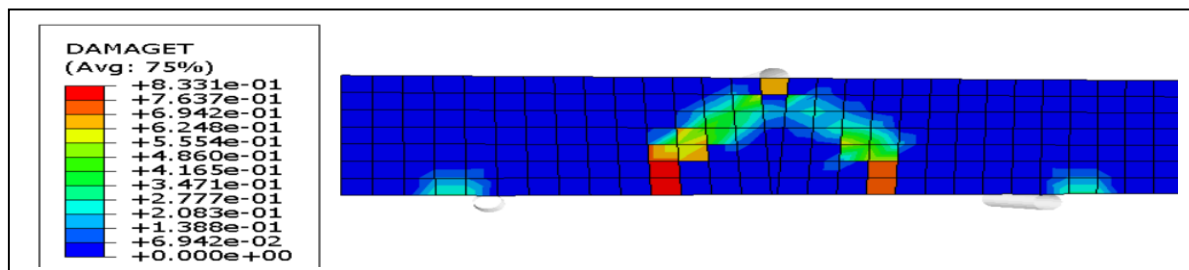


Figure IV 10 : Évolution de l'endommagement dans la poutre.

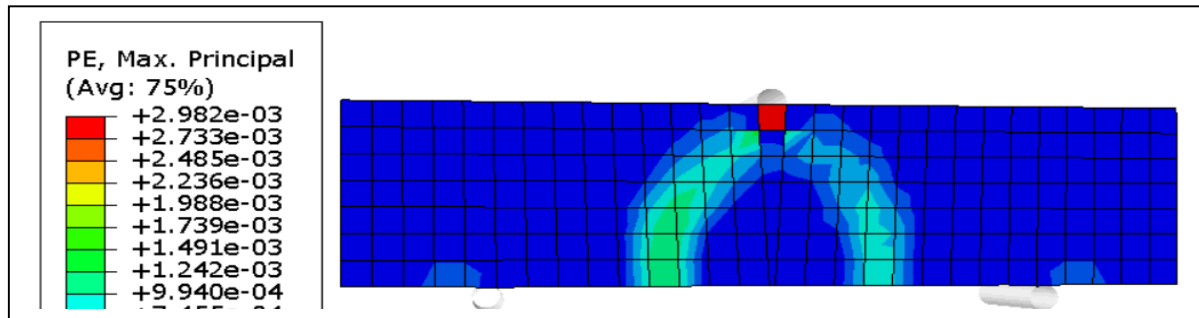


Figure IV 11 : Évolution des fissures.

L'analyse de résultats montre que le comportement a une même allure mais une augmentation de la force appliquée et par conséquent du moment fléchissant. La valeur maximale de la force $F_{max} = 15,7$ KN et le déplacement correspondant est de 0,043 mm. Les fissures apparaissent et se situent aux extrémités de la plaque composite (zone non renforcée).

IV-8-3) Poutre renforcée : Cas de 12.4cm

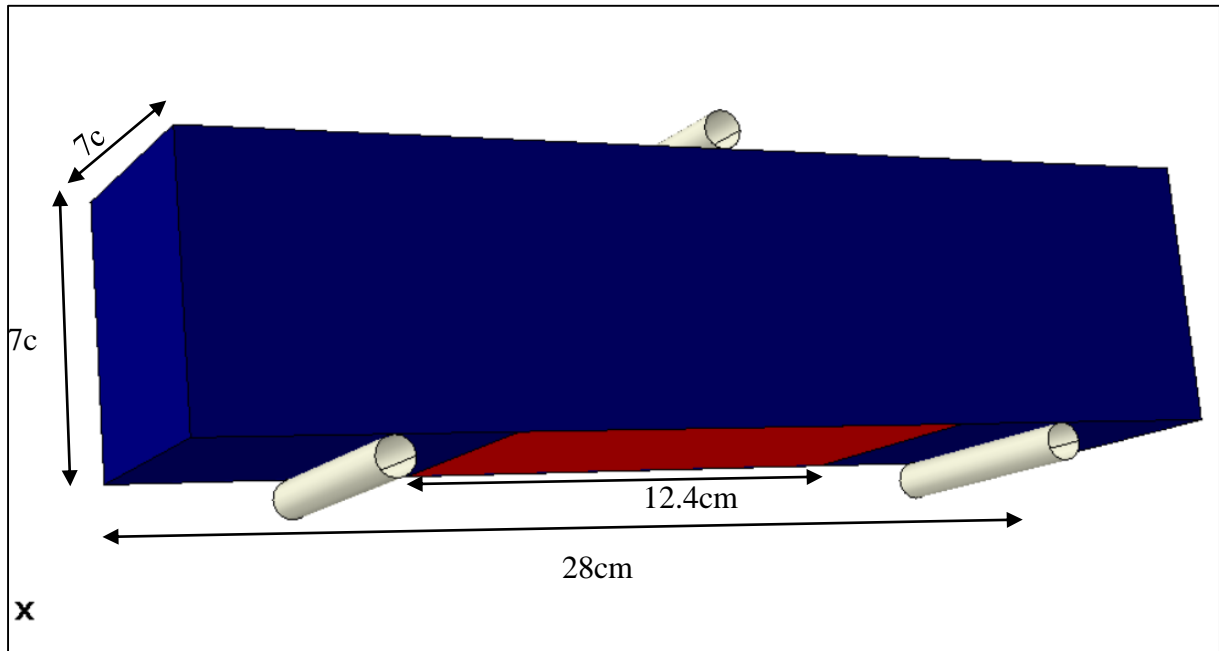


Figure IV 12 : Mode de chargement de la Poutre renforcée par

Une plaque de 12,4 cm de longueur.

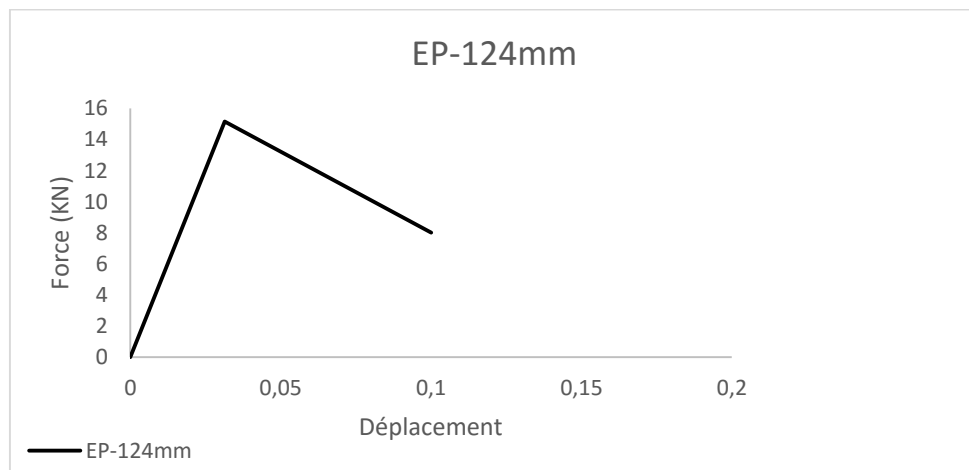


Figure IV 13: Courbe Force – déplacement de la poutre avec plaque composite

$L_p = 12,4 \text{ cm}$

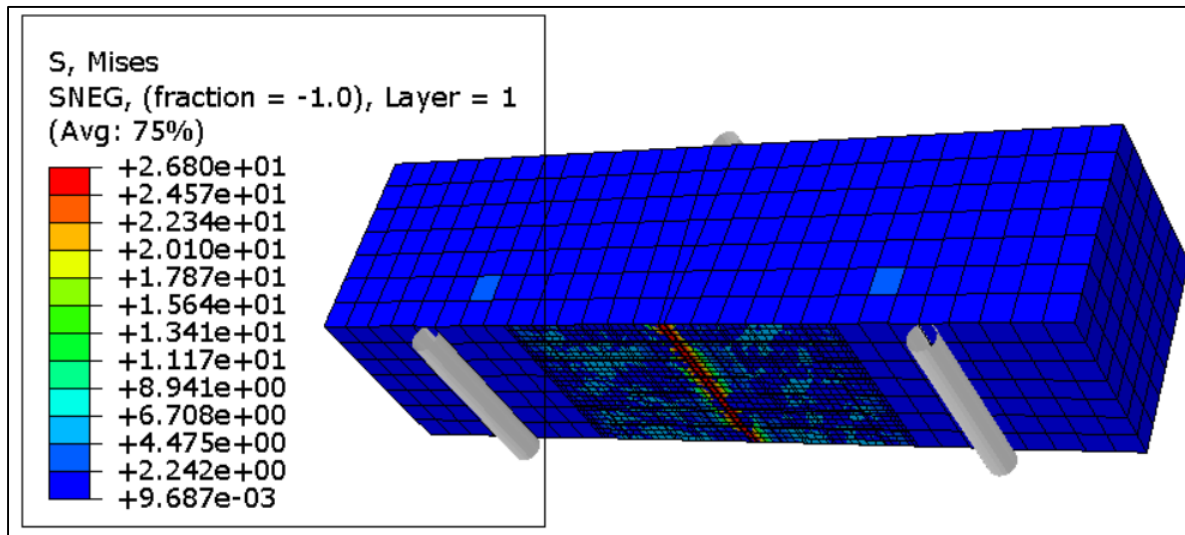


Figure IV 14 : Évolution des contraintes dans les variantes 2 e=12.4cm.

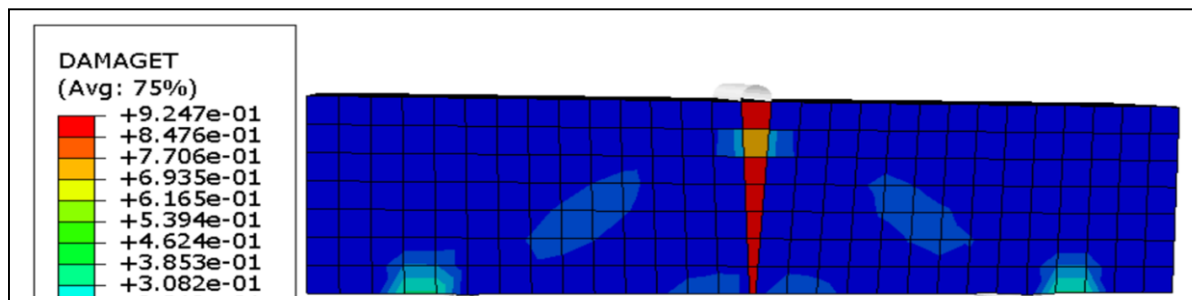


Figure IV 15 : Évolution de l'endommagement dans la poutre.

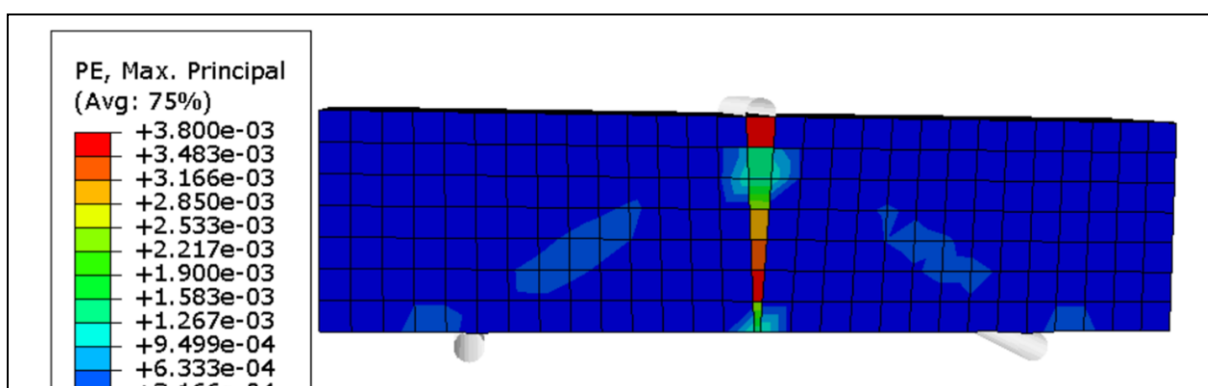


Figure IV 16 : Évolution de la fissuration dans la poutre.

Les résultats indiquent qu'il n'y a pas de modification dans le comportement, cependant on observe une hausse de la force appliquée par rapport à la poutre de référence. En revanche, comparée à la poutre renforcée par une plaque, la force de rupture diminue légèrement. La force maximale est de 15,149 KN et le déplacement associé s'élève à 0,031mm. Cela indique que la dimension de la plaque de 6,2 cm peut être jugée idéale, puisqu'elle autorise une large reprise du moment induit par une charge plus lourde que celle mise en jeu pour la poutre de référence. Le mode de rupture observé est par flexion.

IV-8-4) Poutre renforcée : Cas de 18.6cm

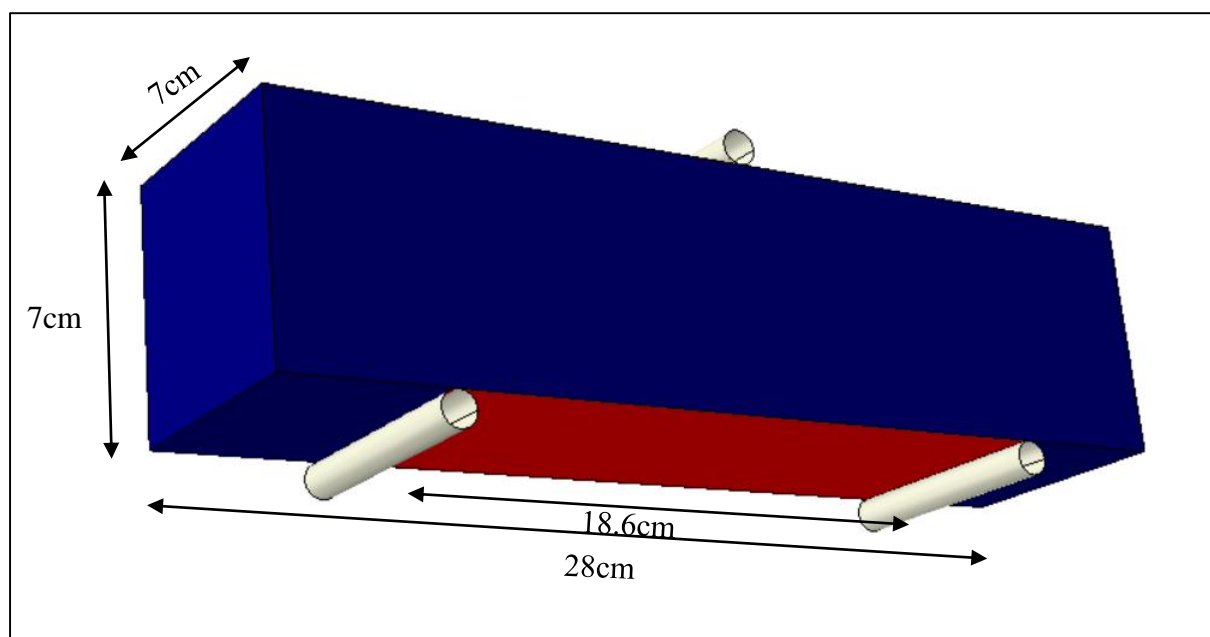


Figure IV 17 : Mode de chargement de la Poutre renforcée par une plaque de 18,6 cm de longueur.

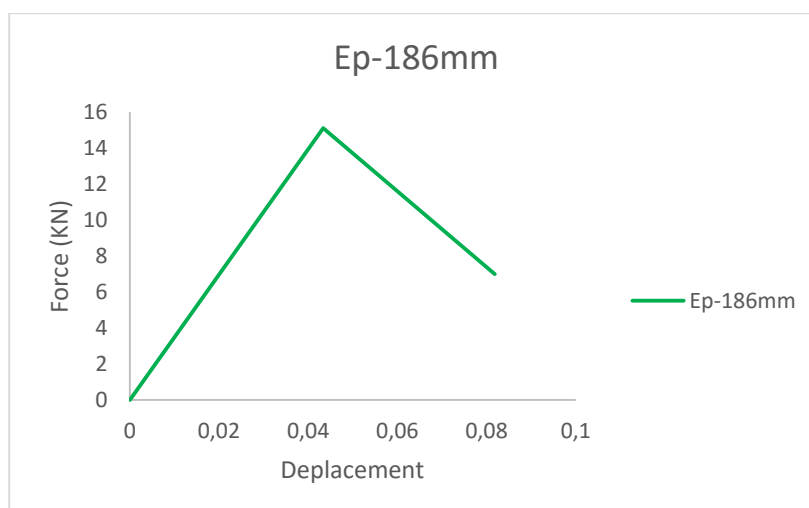


Figure IV 18 : Courbe Force – déplacement de la poutre avec plaque composite

$L_p = 18,6 \text{ cm}$.

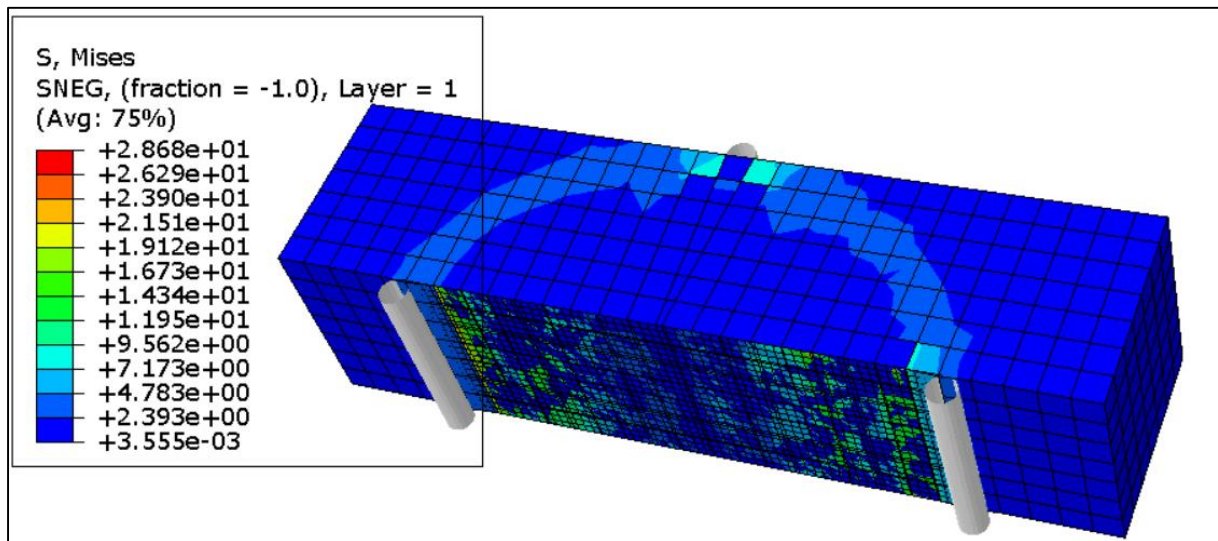


Figure IV 19: Évolution des contraintes dans la variantes 1 $e=18.6\text{cm}$.

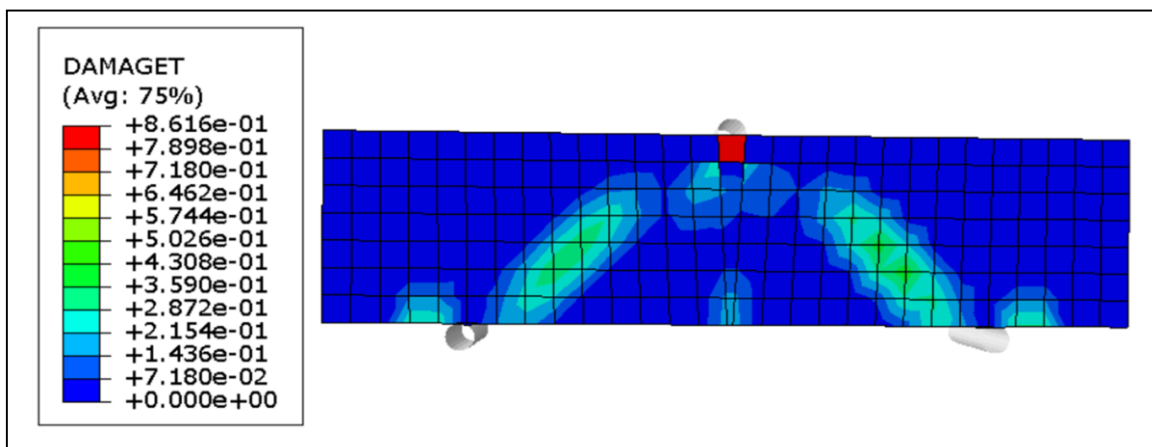


Figure IV 20 : Évolution de l'endommagement dans la poutre.

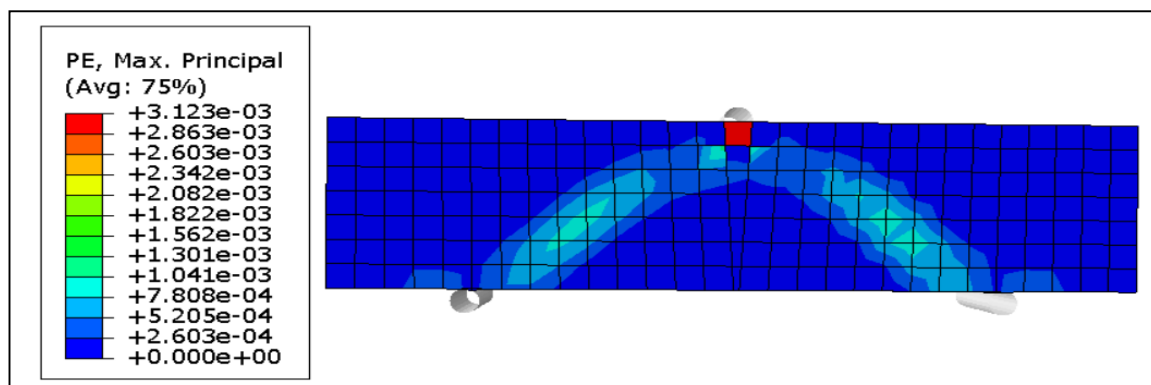


Figure IV 21 : Évolution de la fissuration dans la poutre.

Les résultats illustrés par les figures confirment la diminution de la force appliquée comparativement aux autres variantes de renforcement. La force de rupture est de $F_{max} = 15,109$ kN et de déplacement correspondant est de 0,043 mm. On note une progression des fissures obliques à la suite du renforcement de la poutre. Bien que nous n'ayons pas constaté d'amélioration de la résistance à la rupture par rapport aux variantes avec une plaque plus courte, nous avons noté une nette amélioration en termes de comportement face aux fissures et aux dommages. Contrairement aux autres situations, la rupture est réalisée par cisaillement.

IV-9) Confrontation des résultats

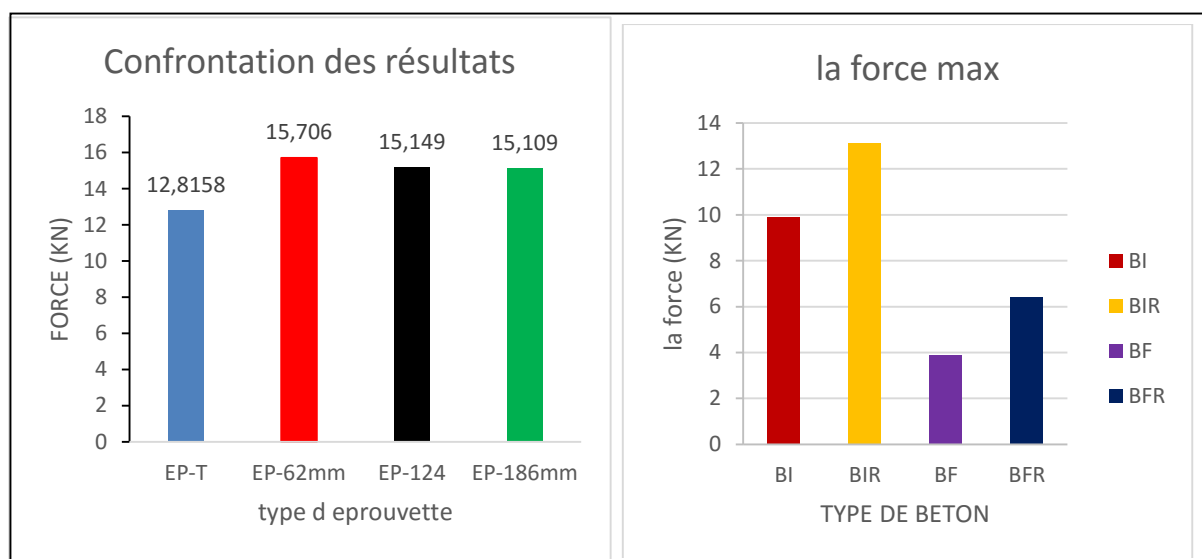


Figure IV 22 : Valeurs de la charge de rupture des poutres.

La simulation EP-T (épreuve de béton intact) surestime la force maximale par rapport à la résultat expérimental de BI d'environ 28.2 %. Cela indique que le modèle numérique prédit une résistance légèrement plus élevée que celle mesurée lors de l'expérience, ce qui peut être dû à des simplifications dans le modèle ou à des variations expérimentales.

Le modèle numérique EP-62mm (épreuve en béton intact renforcé par résine de largeur 62mm) surestime la force expérimentale BIR d'environ 20%.

La différence est relativement faible, indiquant une bonne concordance entre la simulation et l'expérimentation, avec une légère surestimation.

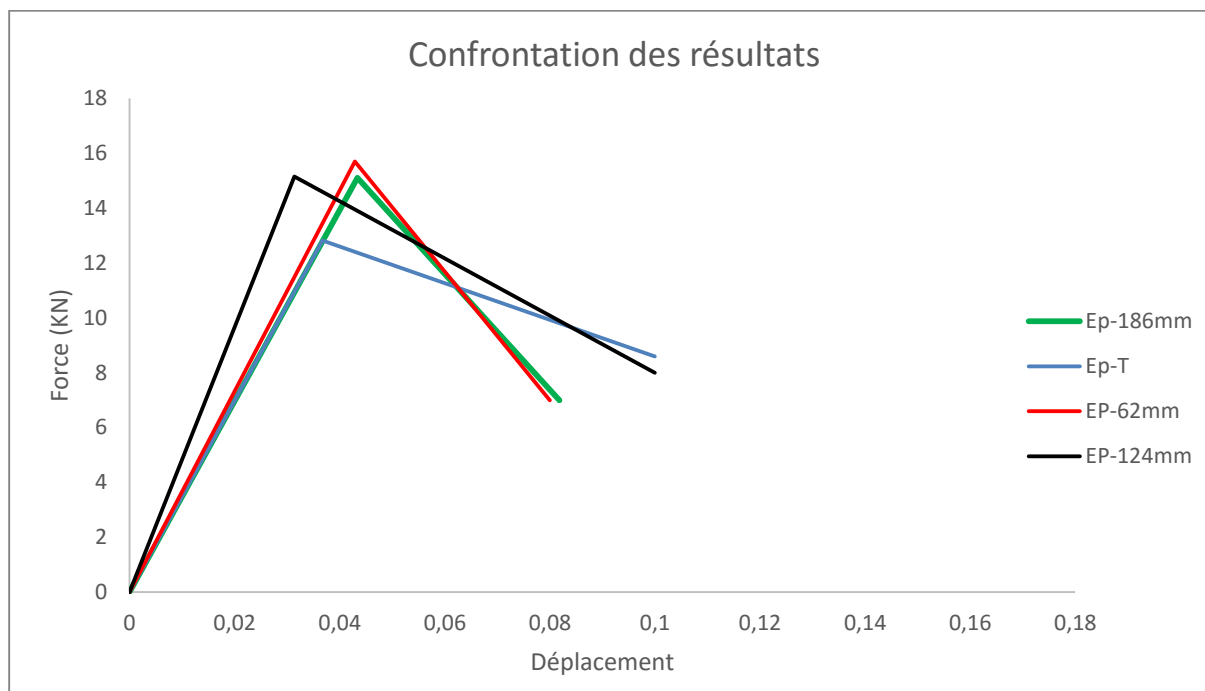


Figure IV 23 : Confrontation des courbes Force de rupture- déplacement des poutres.

L'analyse des valeurs maximales de forces de rupture et des graphes Force-déplacement souligne l'importance d'ajuster les dimensions des plaques composites renforçant les poutres. En effet, après une taille optimale limite, l'allongement de la plaque ne procure aucun bénéfice supplémentaire.

IV-10) Conclusion :

Ce chapitre a démontré l'apport significatif de la modélisation numérique dans l'analyse du comportement des structures en béton partiellement renforcées par des matériaux composites sous flexion. Grâce à l'utilisation du logiciel Abaqus, reposant sur la méthode des éléments finis, il a été possible de simuler avec précision l'évolution des contraintes, des déformations et des dommages subis par les poutres en béton, qu'elles soient nues ou renforcées. Le modèle d'endommagement plastique du béton a permis de prendre en compte la nature quasi-fragile de ce matériau, en intégrant la dégradation progressive de sa rigidité sous sollicitation. En parallèle, le comportement orthotrope du composite de type GFRP a été modélisé à l'aide de critères de rupture adaptés, tels que celui de Hill-Tsai.

Les résultats numériques obtenus ont montré que le renforcement par plaques composites améliore nettement la résistance et la ductilité des poutres. L'analyse comparative des différentes longueurs de plaques a permis d'identifier des zones critiques d'apparition de fissures et de valider l'influence de la taille du renfort sur le comportement global de la

structure. Ainsi, la modélisation numérique s'est révélée être un outil puissant pour optimiser le dimensionnement des renforcements et prévoir le comportement structurel jusqu'à la rupture. Ce travail met en évidence l'efficacité du renforcement composite et suggère une longueur optimale des plaques pour une meilleure performance en flexion.

Conclusion générale

À travers ce travail nous avons cherché à élaborer des résines chargées à base de fibres en poil de chameau et à base de fibres de verre, afin de traiter les fissures dues à la traction des éléments de structure.

La première partie est dédiée à la présentation des matériaux à étudier, Les divers types et leurs caractéristiques ainsi que les domaines d'application. Par la suite, un protocole expérimental en trois phases est considéré. La première phase consistait à identifier et de caractériser les matériaux à étudier, la deuxième phase, est réservée à la préparation des spécimens en considérant différentes variantes de renforcement, alors que la troisième, était réservée aux essais de comportement des matériaux, afin de mettre en évidence l'effet du type de la fibre utilisée, de sa longueur et son dosage (fraction volumique des fibres).

L'étude numérique à l'aide du logiciel de simulation à base des éléments finis 'ABAQUS', qui permet à traiter une grande diversité de problèmes mécaniques est également présentée. Une présentation générale sur la modélisation numérique et les lois de comportement sont insérées. La simulation numérique est conduite pour montrer l'impact de l'épaisseur d'une plaque composite de forme cubique sous une charge de compression. L'étude numérique a permis d'examiner tous les résultats comme les contraintes, les déformations et les modes de rupture à travers des diagrammes et cartographies, en montrant la progression des contraintes et les dommages pour une meilleure compréhension du comportement de ces structures.

Les différents résultats obtenus, mettent en exergue l'impact du renforcement de la résine époxy avec les fibres de verre et de poil de chameau sur l'amélioration des performances mécanique de composite.

Les résultats montrent que l'incorporation des fibres améliore sensiblement la résistance à la traction de la résine époxy. En fait, cette résistance peut être augmentée de 36.44% à 96.43% selon le type de fibre, sa longueur et sa fraction volumique.

Dans le cas de la fibre de verre, la dimension 0,5 cm avec un pourcentage de 1 % donne de meilleurs résultats. En revanche, la fibre de poil de chameau donne une résistance maximale pour une dimension de 1 cm avec un pourcentage de fibres de 0,5%.

En général, les résultats montrent que les fibres courtes de 0,5 cm des deux natures, présentent des meilleures résistances avec un pourcentage de dosage de 1 %. Alors que pour les

fibres longues de 1 cm de longueur, le pourcentage idéal qui donne des résistances dépend de la nature de la fibre.

En comparant la nature de fibre, la fibre de verre présente une meilleure résistance par rapport à celle de poil de chameau. Mais cela n'empêche pas que ce dernier présente aussi des bonnes résistances à la traction qui peut atteindre 49.71 MPa avec une augmentation de 88,29% par rapport à la résine non chargée avec 26,4 MPa. La fibre de poil de chameau a donné un autre avantage par rapport à la fibre de verre, la phase élastique du matériau est améliorée et rend le composite plus ductile.

Les résultats des essais de flexion sur les poutres en béton renforcées par de la résine chargée ont donnés de bonne amélioration de la résistance de plus de 100% d'augmentation, que ce soit pour une poutre en béton intact ou bien une poutre en béton fissuré.

La modélisation numérique a démontré l'apport significatif dans l'analyse du comportement des structures en béton partiellement renforcées par des matériaux composites sous flexion. Suite à l'utilisation du logiciel Abaqus, en reposant sur la méthode des éléments finis, il a été possible de simuler avec précision l'évolution des contraintes, des déformations et des dommages subis par les poutres en béton, qu'elles soient nues ou renforcées.

Les résultats numériques obtenus ont montré que le renforcement par plaques composites améliore nettement la résistance et la ductilité des poutres. L'analyse comparative des différentes longueurs de plaques a permis d'identifier des zones critiques d'apparition de fissures et de valider l'influence de la taille du renfort sur le comportement global de la structure. Ainsi, la modélisation numérique s'est révélée être un outil puissant pour optimiser le dimensionnement des renforcements et prévoir le comportement structurel jusqu'à la rupture. Ce travail met en évidence l'efficacité du renforcement composite et suggère une longueur optimale des plaques pour une meilleure performance en flexion.

En perspectif, la réalisation des autres types d'essais en caractérisant plus le matériau composite comme la résistance à la compression, le retrait et l'adhérence, résistance au choc, reste un objectif important pour bien améliorer ce matériau. L'utilisation de d'autres types de résine est souhaitable pour une meilleure performance du renforcement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] MDPI. (2019). Mechanical Properties of Epoxy Resin Reinforced with Natural Fibers. <https://doi.org/10.3390/jcs5030089>
- [2] Laouchedi, D. (2014). Élaboration et caractérisation d'un matériau composite à base de résine époxy et charges minérales (Mémoire de Magistère). Université M'hamed Bougara – Boumerdès.
- [3] Chaib, A., & Houari, H. (2021). Caractérisation de la résine époxy LR 285 et son durcisseur LH 285 renforcée avec des tissus en fibre de verre (Projet de fin d'études, Diplôme d'ingénieur d'État en Génie des Matériaux).
- [4] Separk. (n.d.). Les propriétés de la résine époxydique. Separk. <https://www.separk.fr/actualites-blog/industrie-logistique/les-proprietes-de-la-resine-epoxydique>
- [5] Résine-Net. (n.d.). Guide complet de la résine époxy : préparation, mélange et application. https://resine-net.com/fr/blog/11_guide-complet-de-la-resine-epoxy-preparation-melange-et-application.html
- [6] Prasad, T. S. S. S. (2011). Polyurethanes: Chemistry, Technology and Applications.
- [7] Hepburn, C. (1991). Polyurethane Elastomers. Springer Science & Business Media.
- [8] Randall, D., & Lee, S. (2002). The Polyurethanes Book. Wiley.
- [9] Wicks, Z. W., Jones, F. N., & Pappas, S. P. (2007). Organic Coatings: Science and Technology. Wiley.
- [10] Oertel, G. (1994). Polyurethane Handbook. Hanser Publishers.
- [11] Synthesia. (n.d.). Applications industrielles du polyuréthane. <https://blog.synthesia.com/fr/applications-industrielles-polyurethane>
- [12] Lorn Chemicals. (n.d.). Résine acrylique Lornacrylic R50. <https://lornchemicals.com/produit/resine-acrylique-lornacrylic-r50/>
- [13] Lorn Chemicals. (n.d.). Résine acrylique Lornacrylic R50. Lorn Chemicals. <https://lornchemicals.com/produit/resine-acrylique-lornacrylic-r50/>

- [14] Gérard, J.-F. (2000). Chimie des matériaux polymères. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [15] Izel Kimya. (n.d.). Polyester Resins. <https://www.izelkimya.com/idet/12/17/polyester-resins>
- [16] Material Properties. (n.d.). Composite de résine polyester. <https://material-properties.org/fr/composite-de-resine-polyester/>
- [17] Ferhat, I. E. (2020). Effet du type de fibres sur les propriétés de l'adobe (Mémoire de Master). Université Mohamed Khider.
- [18] Textile Learner. (n.d.). Glass fiber: types, properties, manufacturing process and applications [En ligne]. Disponible sur : <https://textilelearner.net/glass-fiber-types-properties-manufacturing-process-and-applications>
- [19] Textile Learner. (n.d.). Carbon fiber: its manufacturing process and uses [En ligne]. Disponible sur : <https://textilelearner.net/carbon-fiber-its-manufacturing-process-and-uses>
- [20] Textile Learner. (n.d.). Kevlar fiber: types, properties, manufacturing [En ligne]. Disponible sur : <https://textilelearner.net/kevlar-fiber-types-properties-manufacturing>
- [21] Textile Learner. (n.d.). High-performance polyethylene fibers: an overview [En ligne]. Disponible sur : <https://textilelearner.net/high-performance-polyethylene-fibers>
- [22] Textile Learner. (n.d.). Polypropylene fiber: properties, applications [En ligne]. Disponible sur : <https://textilelearner.net/polypropylene-fiber-properties-applications>
- [23] Textile Learner. (2025). Polypropylène fiber: properties, applications [Consulté le 4 février 2025]. <https://textilelearner.net/polypropylene-fiber-properties-applications>
- [24] Gadi, A. K., Mega, H. A., Baci, M. A., & Necib, D. (2022). Étude comparative des différentes méthodes de formulation de béton (Mémoire de fin d'études). Matériaux en Génie Civil.
- [25] Département Mécanique et Procédés d'Élaboration, Centre Science des Matériaux et des Structures & UMR CNRS 5146, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne. (n.d.). Document institutionnel. 158, cours Fauriel, 42023 Saint-Étienne.
- [26] Textile Addict. (n.d.). Fibre textile : le poil de chameau. <https://textileaddict.me/fibre-textile-le-poil-de-chameau/>