

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA**



Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie civil

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté par :

**REMIDI ABDELHAK**

**DOUGAREM YACINE**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 02** en :

Filière : Génie civil

Option : Structure

**Thème :**

**Plaques de Renforcement à Base de Résine Renforcée  
par Fibres Issues de la Récupération**

**Devant le jury composé de :**

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

**Année Universitaire 2024/2025**

**REMERCIEMENTS :**

**DEDICACE**

**DEDICACE**

**LISTE DES TABLEAUX**

**LISTE DES FIGURES**

**RESUME**

**ABSTRACT**

**الملخص**

**INTRODUCTION GENERALE..... 1**

I.1	INTRODUCTION:.....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
I.2	ÉTAT DE CONNAISSANCE : .....	5
I.2.1	<i>Composites pour le renforcement des structures :</i> .....	5
I.2.2	<i>Types de fibres couramment utilisées :</i> .....	5
I.2.3	<i>Composites hybrides :</i> .....	6
I.2.4	<i>Valorisation des fibres récupérées :</i> .....	6
I.3	MATERIAUX COMPOSITES : .....	6
I.3.1	<i>Fondements des matériaux composites :</i> .....	6
I.3.2	<i>Caractéristique Générale :</i> .....	6
I.3.3	<i>Constituants fondamentaux des matériaux composites :</i> .....	7
I.4	LES RESINE : .....	7
I.4.1	<i>Type de résine :</i> .....	8
I.4.1.1	Résines thermodurcissables : .....	8
I.4.1.2	Résines thermoplastiques : .....	10
I.5	LES FIBRES : .....	10
I.5.1	<i>Types de fibres :</i> .....	11
I.5.1.1	Fibres de verre : .....	11
I.5.1.2	Fibres de Carbon : .....	12
I.5.1.3	Fibres de kevlar : .....	13
I.5.1.4	Fibres de Polyéthylène : .....	14
I.5.1.5	Fibres de polypropylène : .....	15
I.6	LE BETON : .....	15
I.6.1	<i>Constituants du béton :</i> .....	16
I.6.1.1	Le ciment : .....	17
I.6.1.2	L'eau : .....	17
I.6.1.3	Granulats : .....	17
I.6.1.4	Adjuvants : .....	17
I.6.2	<i>Comportement mécanique du béton :</i> .....	18
I.6.2.1	béton en compression : .....	18
I.6.2.2	Béton en traction : .....	18
I.7	CONCLUSION : .....	19

<b>II.1</b>	<b>INTRODUCTION :</b> .....	21
<b>II.2</b>	<b>FABRICATION DES EPROUVETTES EN BETON :</b> .....	21
	<i>II.2.1 Essai d'identification et caractérisation des matériaux :</i> .....	23
	II.2.1.1 Analyse granulométrique : (selon la norme NF P 18-560).....	23
	II.2.1.2 La masse volumique : (NF EN 1097-6).....	27
	II.2.1.3 Equivalent de sable : (NF P 18-598) :.....	30
	II.2.1.4 Début et fin de prise : (NF P 15-473).....	33
	<i>II.2.2 Formulation du béton par la méthode de DREUX-GORISSE :</i> .....	33
	<i>II.2.3 Essai sur béton frais :</i> .....	34
	II.2.3.1 Affaissement au cône d'Abrams : (NF EN 12350-2).....	34
	<i>II.2.4 Confections des éprouvettes en béton :</i> .....	35
<b>II.3</b>	<b>FABRICATION DES EPROUVETTES EN RESINE RENFORCEE ET NON RENFORCEE :</b> .....	36
	<i>II.3.1 Préparation des fibres :</i> .....	36
	II.3.1.1 Mat de verre :.....	36
	II.3.1.2 Fibre de polymère (PEHD) :.....	37
	<i>II.3.2 Préparation de résine :</i> .....	38
	II.3.2.1 Résine époxy :.....	38
	II.3.2.2 Élaboration des éprouvettes de résine époxy avec des fibres :.....	39
	II.3.2.3 Différentes variantes :.....	42
<b>II.4</b>	<b>TECHNIQUE DE CARACTERISATION :</b> .....	43
	<i>II.4.1 Propriété mécanique de béton :</i> .....	43
	II.4.1.1 Essai de la résistance à la compression : (NF EN 196-1).....	43
	II.4.1.2 Essai de la résistance à la traction par flexion : (NF P 15-471).....	44
	<i>II.4.2 Propriété mécanique de résine renforcée non renforcée :</i> .....	44
	II.4.2.1 Essai de traction :.....	44
	<i>II.4.3 Propriété mécanique des éléments de structure (éprouvette de béton + plaque en résine) :</i>	
	45	
<b>II.5</b>	<b>CONCLUSION :</b> .....	45
<b>III.1</b>	<b>INTRODUCTION :</b> .....	47
<b>III.2</b>	<b>ESSAI DE TRACTION DES EPROUVETTES DE RESINE RENFORCEES ET NON RENFORCEES :</b>	47
	<i>III.2.1 Courbes contrainte-déformations :</i> .....	47
	<i>III.2.2 Effet de pourcentage de fibres sur la résistance à la traction :</i> .....	52
	III.2.2.1 Renforcement par des fibres de polymères :.....	52
	III.2.2.2 Renforcement par des Fibres de verre :.....	54
	III.2.2.3 Renforcement par des fibres hybrides :.....	55
	<i>III.2.3 Effet de dimension de fibres sur la résistance à la traction :</i> .....	56
	<i>III.2.4 Confrontation des courbes :</i> .....	57
<b>III.3</b>	<b>ESSAI DE COMPRESSION DES EPROUVETTES DE RESINE RENFORCEES ET NON RENFORCEES :</b>	59
<b>III.4</b>	<b>CONCLUIONS</b> .....	60
<b>IV.1</b>	<b>INTRODUCTION :</b> .....	62
<b>IV.2</b>	<b>PRESENTATION SUCCINCTE DU LOGICIEL ABAQUS :</b> .....	62

IV.3 MAILLAGE ET MEF .....	62
IV.4 MODELISATION DU COMPORTEMENT DES MATERIAUX .....	63
IV.5 MODELE NON LINEAIRE POUR BETON : .....	63
<i>IV.5.1 Comportement en compression : .....</i>	<i>63</i>
<i>IV.5.2 Modèle élastique orthotrope pour les FRP .....</i>	<i>65</i>
IV.6 PRESENTATION DES MODELES : .....	65
IV.7 PRESENTATION DES RESULTATS ET DISCUSSION .....	66
IV.8 ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSION : .....	70
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>72</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>

## *Remerciements :*

*Nous adressons avant tout notre gratitude à dieu, le tout-puissant, pour la force, la volonté et la patience qu'il nous a accordées tout au long de la réalisation de ce travail.*

*Nos remerciements vont particulièrement à nos promoteurs **DR. MOKEDDEM Y. et Pr. AIT TAHAR K.** pour leurs orientations et leurs conseils durant l'évolution de ce travail*

*Nous remercions tous nos enseignants durant toute notre cursus ainsi que Madame **AIT ALI SALIMA et DR, BOUAMRA Y et MME. MERIEM. S** qui nous a soutenus et accompagnés dans la réalisation de ce travail.*

*Nous n'oublions pas de remercier les techniciens de laboratoire de génie civile et laboratoire de recherche de Boumerdes et ainsi que tout le personnel ayant contribué, de près ou de loin, à la réussite de notre étude expérimentale.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à notre famille, dont le soutien moral et les encouragements constants ont été essentiels à l'aboutissement de ce travail.*

**ABDELHAK et YACINE**

## DEDICACE

*Je dédie ce modeste travail :*

*À mes très chers parents SAMIA et ABDELKADR qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.*

*À mes chers frère FAROUK et AHMED DIAA EL-DIN.*

*À ma chère sœur MERYAM.*

*À ma chère grand-mère, RBIHA*

*À toute ma famille sans exception.*

*À tous mes amis.*

*En fin, je remercie mon binôme YACINE.*

*À Vous.*

ABDELHAK

## DEDICACE

*Je dédie ce modeste travail à :*

- ❖ *Ma mère, mon père, sans eux, je n'aurais pas abouti à ce stade d'étude, que Dieu puisse m'aider à les honorer, les servir et les combler.*
- ❖ *A Tous mes amis.*
- ❖ *A mes frères et ma sœur.*
- ❖ *A Ma famille.*
- ❖ *A mes proches : (SELAMI- WAEL - IMAD - ISLAM - L JOUABI - OMAR - MUSTAFA - MOHAMED - MEROUANE - YACINE)*
- ❖ *Mon binôme : (ABDELHAKI)*

*YACINE*

## *LISTE DES TABLEAUX*

Tableau II - 1: Analyses chimique de l'eau. ....	23
Tableau II - 2: Analyse granulométrique du gravier 3/8. ....	25
Tableau II - 3: Analyse granulométrique du gravier 8/15. ....	25
Tableau II - 4: Analyse granulométrique du sable 0/3.....	26
Tableau II - 5: Analyse granulométrique du sable fin. ....	26
Tableau II - 6: Masse volumique apparente du gravier 3/8.....	28
Tableau II - 7: Masse volumique apparente du gravier 8/15.....	28
Tableau II - 8: Masse volumique apparente du sable 0/3.....	28
Tableau II - 9: Masse volumique apparente du sable fin.....	28
Tableau II - 10: Masse volumique absolue du gravier 3/8. ....	29
Tableau II - 11: Masse volumique absolue du gravier 8/15. ....	29
Tableau II - 12: Masse volumique absolue du sable 0/3. ....	30
Tableau II - 13: Masse volumique absolue du sable fin. ....	30
Tableau II - 14: Résultats de l'essai d'équivalence sable (sable 0/3).....	32
Tableau II - 15: Résultats de l'essai d'équivalence sable (sable fin).....	32
Tableau II - 16: Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalence de sable <b>ESV</b> et <b>Esp</b> . .....	32
Tableau II - 17: Résultats d'essai de début eu fin de prise du ciment. ....	33
Tableau II - 18: Formulation de béton pour 1m <sup>3</sup> .....	34
Tableau II - 19 : Classement de béton selon la valeur au d'affaissement au cône d'Abram. ...	34
Tableau II - 20: Dimensions de l'éprouvette de traction suivant la norme 527-2.....	40
Tableau II - 21: résultats de l'essai de compression.....	43
Tableau II - 22: résultats de l'essai de traction.....	44
Tableau III - 1: Résultats de l'essai de traction pour les différentes variantes.....	47
Tableau III - 2: Valeurs d'augmentation de la résistance à la traction – résine renforcé par fibre de polymère. ....	53
Tableau III - 3: Valeurs d'augmentation de la résistance à la traction – résine renforcé par fibre de verre. ....	54
Tableau III - 4: Valeurs d'augmentation de la résistance à la traction – résine renforcé par fibres hybrides.....	55
Tableau III - 5: résultats d'écrasement .....	59

## *LISTE DES FIGURES*

Figure I- 1: Schéma de principe d'un matériau composite.....	7
Figure I- 2: Présentation morphologique des fibres de verre.....	11
Figure I- 3: Présentation morphologique des fibres de carbon.....	12
Figure I- 4: Présentation morphologique des fibres de kevlar. ....	13
Figure I- 5: Présentation morphologique des fibres de Polyéthylène . ....	14
Figure I- 6: Les principales matières utilisées dans la formulation du béton [23].....	16
Figure I- 7: Photographie d'un matériau en béton [23].....	16
Figure I- 8: Loi de comportement du béton en compression sous chargement statique. ....	18
Figure I- 9: Evolution de la résistance à la traction $f_{tj}$ en fonction de celle ..... 19	19
Figure II - 1: Gravier 3/8 et 8/15 concassés d'oued el Bardi.....	21
Figure II - 2: Sable fin de Boussaâda ..... 22	22
Figure II - 3: Sable 0/3 d'Oued el Berdi ..... 22	22
Figure II - 4 : Ciment portland de type CEM II/A-L 42,5 R. .... 22	22
Figure II - 5: Superplastifiant haut réducteur d'eau. .... 23	23
Figure II - 6: Série de tamis et tamiseuse électrique ..... 24	24
Figure II - 7: Courbes granulométrique des échantillons. .... 27	27
Figure II - 8: Essai équivalente de sable. .... 31	31
Figure II - 9: Essai de prise. .... 33	33
Figure II - 10: Essai d'affaissement au cône d'Abrams. .... 35	35
Figure II - 11: éprouvette cylindrique du béton 16*32..... 36	36
Figure II - 12: éprouvette prismatique du béton 7*7*28..... 36	36
Figure II - 13: Mat de fibre de verre [24]. .... 37	37
Figure II - 15 : déchets des tuyaux (PEHD). .... 37	37
Figure II - 14: fibres de polymère ..... 37	37
Figure II - 16: Résine époxy et son durcisseur. .... 38	38
Figure II - 17: Dimensions de l'éprouvette de traction suivant la norme 527-2 ..... 39	39
Figure II - 18: Moule métallique suivant la norme ISO 527-2..... 40	40
Figure II - 19: éprouvettes de résine témoin. .... 41	41
Figure II - 20: éprouvettes de résine renforcée en fibre de verre. .... 41	41
Figure II - 21: éprouvettes de résine renforcée en fibre de polymère ..... 42	42
Figure II - 22: machine de compression..... 43	43
Figure II - 23: machine de traction de traction par flexion. .... 44	44
Figure II - 24: machine de traction Zwick/Roell. .... 45	45

Figure III - 1: courbe contrainte-déformation d'éprouvette de résine époxy non renforcée...	48
Figure III - 2: courbe contrainte-déformation des éprouvettes de résine époxy renforcée avec fibre polymère de 1 cm.....	48
Figure III - 3: courbe contrainte-déformation des éprouvettes de résine époxy renforcée avec fibre polymère de 1.5 cm.....	49
Figure III - 4: courbe contrainte-déformation des éprouvettes de résine époxy renforcée avec fibre verre de 1 cm. ....	50
Figure III - 5: courbe contrainte-déformation des éprouvettes de résine époxy renforcée avec fibre verre de 1.5 cm. ....	50
Figure III - 6: courbe contrainte-déformation des éprouvettes de résine époxy renforcée avec fibre hybride. ....	51
Figure III - 7: Courbes contrainte-déformation comparatives (EP / EP-P / EP-V / EP-PV)....	51
Figure III - 8: effet de pourcentage de fibres de polymère sur la résistance à la traction. ....	52
Figure III - 9: effet de pourcentage de fibres de verre sur la résistance. ....	54
Figure III - 10: effet de pourcentage des fibres hybrides sur la résistance.....	55
Figure III - 11: effet de dimension de fibres de polymère sur la résistance à la traction. ....	56
Figure III - 12: effet de dimension de fibres de verre sur la résistance à la traction. ....	56
Figure III - 13: Confrontation des courbes contrainte-dimension de fibre des éprouvettes en résine renforcée par des fibres de 1,5 cm .....	57
Figure III - 14: Confrontation des courbes contrainte-pourcentage de fibre des éprouvettes en résine renforcée par des fibres de 3%. ....	58
Figure III - 15: valeurs maximales des contraintes à la traction des différentes variantes .....	58
Figure III - 16: Variation de la contrainte en compression en fonction de l'épaisseur de la plaque. ....	60
Figure IV- 1: Comportement du béton soumis à une compression uni axiale [27]. ....	64
Figure IV- 2: dimensions et mode de chargement du socle d'appui hybride .....	65
Figure IV- 3: Evolution des contraintes .....	66
Figure IV- 4: Evolution de l'endommagement .....	66
Figure IV- 5: Evolution de la fissuration .....	66
Figure IV- 6: Evolution des contraintes pour la poutre avec plaque FRP 4 cm. ....	67
Figure IV- 7: Evolution de l'endommagement .....	67
Figure IV- 8: Evolution de la fissuration.....	68
Figure IV- 9: Evolution des contraintes dans les plaques FRP - 6cm. ....	68
Figure IV- 10: Evolution de l'endommagement dans la poutre. ....	69
Figure IV- 11: Evolution de la fissuration dans la poutre.....	69
Figure IV- 12: Confrontation des courbes Force de rupture- déformation des spécimens d'étude.....	70

## ***Résumé***

Dans le domaine de la construction industrielle, les équipements lourds provoquent des vibrations intenses sollicitant ainsi les éléments de structures à des charges mécaniques intenses et parfois à des chocs brutaux. Les conséquences de ces sollicitations dynamiques ne se font pas attendre : elles provoquent, à moyen ou long terme, une dégradation progressive des structures de support, se manifestant notamment par des fissurations, ou des ruptures.

Les plaques de supports des machines et équipements lourds sont traditionnellement fabriquées à partir de matériaux rigides tels que le béton ou les alliages métalliques. Malgré leur solidité et leur robustesse, ces solutions montrent des limites dans des contextes exigeants. Ces matériaux se dégradent de manière progressive, surtout quand ils sont soumis à des cycles vibratoires prolongés et à des températures élevées. Cette dégradation peut mettre en péril la solidité structurelle des installations, provoquer des perturbations de production imprévues et augmenter le coût lié à leur entretien.

Pour remédier à ce problème, une solution innovante consiste à développer des plaques de renforcement composite élaborées à partir de résine époxy renforcée par des fibres hybrides issues de la récupération composées de polymère et de fibres de verre. Cette approche vise en même temps une performance mécanique optimale et un développement durable, en valorisant des matériaux secondaires qui seraient autrement éliminés.

L'objectif principal de travail est d'élaborer une plaque en résine renforcée par une des fibres ou une combinaison de fibres de natures différentes, et d'étudier l'influence du type des fibres, de leurs dimensions et leur fraction volumique sur le comportement mécanique. L'étude expérimentale et numérique réalisée des différentes variantes permet d'optimiser la composition pour un meilleur rendement.

**Mots-clés :** composite, plaque, renforcement, époxy, Fibres, test, simulation

## ***Abstract***

In the field of industrial construction, heavy equipment causes intense vibrations, thus subjecting the elements of structures to intense mechanical loads and sometimes to brutal shocks. The consequences of these dynamic solicitations are not long in coming: they cause, in

the medium or long term, a progressive degradation of support structures, manifested notably by cracks, or ruptures.

The support plates of heavy machinery and equipment are traditionally made from rigid materials such as concrete or metal alloys. Despite their solidity and robustness, these solutions show limits in demanding contexts. These materials degrade gradually, especially when subjected to prolonged vibration cycles and high temperatures. This degradation can jeopardize the structural soundness of the installations, cause unforeseen production disruptions and increase the cost related to their maintenance.

To address this issue, an innovative solution involves developing reinforcement plates made from epoxy resin reinforced with recovered hybrid fibers composed of polymer and glass. This approach aims for both optimal mechanical performance and sustainable development by repurposing secondary materials that would otherwise be discarded.

The main objective of the work is to elaborate a resin plate reinforced by one of the fibers or a combination of fibers of different natures, and to study the influence of the type of fibers, their dimensions and their volume fraction on the mechanical behavior. The experimental and numerical study carried out of the different variants allows to optimize the composition for a better yield.

**Keywords:** Composite, plate, . reinforcement,. epoxy, Fibers., test, simulation

## المخلص

في مجال البناء الصناعي، تسبب المعدات الثقيلة اهتزازات شديدة، مما يعرض عناصر الهياكل لأحمال ميكانيكية شديدة وأحياناً لصدمات وحشية. إن العواقب المترتبة على هذه الالتامسات الديناميكية لن تستغرق وقتاً طويلاً: فهي تتسبب، على المدى المتوسط أو الطويل، في تدهور تدريجي

تُصنع ألواح الدعم للآلات والمعدات الثقيلة تقليدياً من مواد صلبة مثل الخرسانة أو السبائك المعدنية. وعلى الرغم من صلابتها وقوتها، فإن هذه الحلول تظهر حدوداً في السياقات الصعبة. تتحلل هذه المواد تدريجياً، خاصة عند تعرضها لدورات اهتزاز طويلة ودرجات حرارة عالية. يمكن أن يؤدي هذا التدهور إلى تعريض السلامة الهيكلية للمنشآت للخطر، والتسبب

ولمعالجة هذا الإشكال، تم اقتراح حل مبتكر يتمثل في تطوير صفائح تدعيم مركبة مصنوعة من راتنج الإيبوكسي المعزز بألياف هجينة مُسترجعة مكونة من البوليمر والزجاج. وتهدف هذه المقاربة إلى تحقيق أداء ميكانيكي ممتاز وفي الوقت نفسه تعزيز التنمية المستدامة من خلال تثمين مواد ثانوية كان من الممكن التخلص منها.

الهدف الرئيسي من العمل هو إعداد لوحة راتنجية معززة بأحد الألياف أو مجموعة من الألياف ذات الطبيعة المختلفة، ودراسة تأثير نوع الألياف وأبعادها ونسبة حجمها على السلوك الميكانيكي. تسمح الدراسة التجريبية والعديدية التي تم إجراؤها للمتغيرات المختلفة

**الكلمات المفتاحية:** مركب، صفيحة، تقوية، إيبوكسي، ألياف، اختبا

# **INTRODUCTION GENERALE**

## **INTRODUCTION GENERALE**

Dans le domaine du génie civil et de l'ingénierie des matériaux, la durabilité et la performance des structures sont désormais des enjeux majeurs face aux sollicitations mécanique, aux chocs et aux vibrations continues. Au cours du temps, certaines structures ou équipements voient leurs performances diminuées, ce qui peut entraîner des arrêts de service coûteux. Tandis que, les conséquences de ces sollicitations dynamiques ne se font pas attendre : elles provoquent, à moyen ou long terme, une dégradation progressive des structures de support, se manifestant notamment par des fissures, des délaminations ou des ruptures localisées.

Dans ce contexte, le renforcement à l'aide de matériaux composites apparaît comme une solution innovante. En effet, au cours des dernières décennies, l'utilisation de matériaux composites à base de résine, en particulier les résines renforcées par des fibres, a connu une croissance notable, en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques, de leur durabilité et de leur capacité à s'adapter à des conditions extrêmes. Autrement, l'utilisation de fibres recyclées s'inscrit dans une stratégie de développement durable, visant à réduire l'impact environnemental.

Dans ce contexte que s'inscrit notre projet de mémoire. L'idée proposée consiste à ne pas renforcer la structure elle-même, mais de concevoir des plaques de renforcement utilisant une matrice de résine époxy, renforcée par des fibres hybrides provenant du recyclage. Ces plaques sont fabriquées à partir de résine époxy combinée de fibres de verre et de fibres polymères (PEHD) récupérées. Cette solution prometteuse permet d'offrir une amélioration de la résistance des structures face aux sollicitations dynamiques et en prolonger la durée de vie. Ces matériaux combinent légèreté et bonne résistance mécanique.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une revue bibliographique divisée en deux parties, abordant les aspects suivants :

En première partie, un état de connaissance sur des travaux liés à notre thématique, il aborde l'utilisation des composites renforcés par des fibres dans les applications liées à la construction.

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

Le deuxième chapitre, est consacré à la partie expérimentale, où nous avons présenté les différentes variantes étudiées composées de résine époxy renforcée par des différents types de

## **INTRODUCTION GENERALE**

fibres, la méthode de préparation des fibres récupérés, la phase d'identification des constituants de béton , la préparation des éprouvettes et les divers essais réalisés.

Le troisième chapitre présente les divers résultats expérimentaux obtenus et leur analyse, on met en évidence l'effet 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 dédié à la simulation numérique de la couple résine-béton, afin de mettre en évidence l'effet de la plaque support en résine époxy renforcée et le comportement d'endommagement globale de la 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 les 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 plaque d'appui et qui les rend dans le cadre des matériaux composites.

En premier lieu, on présente une synthèse des travaux sur l'état de connaissance des matériaux composites, le renforcement par des fibres et les applications dans le domaine de la construction. Les divers types de résines et des fibres sont présentés, en particulier leurs propriétés et leurs domaines d'application ainsi que les constituants du béton et les plaques composites.

## I.2 État de connaissance

### I.2.1 Composites pour le renforcement des structures

Les composites polymères fibrés sont de plus en plus utilisés pour la réhabilitation et la construction d'ouvrages civils. Cependant, leur utilisation récente soulève des questions sur leur durabilité à long terme en conditions réelles. Leur comportement face au feu notamment reste une préoccupation majeure [1].

La réhabilitation ou le renforcement des infrastructures en béton par des matériaux composites est une technique bien établie, développée dans les années 1990. Elle est considérée comme efficace et économique, en alternative au remplacement des éléments en béton armé (BA) endommagés ou structurellement déficients [1].

Urs Meier (1995) a étudié l'utilisation de composites carbone/époxy pour renforcer les structures. L'article présente plusieurs exemples de structures renforcées avec succès, tels que des ponts et des bâtiments. En conclusion, L'auteur souligne que les composites à base de fibre de carbone représentent une solution innovante et durable pour prolonger la durée de vie des infrastructures existantes [2].

### I.2.2 Types de fibres couramment utilisées :

Dans le domaine d'utilisation des matériaux composites, il existe plusieurs types de fibres que l'on peut utiliser, généralement, des fibres de verre, de carbone et d'aramide sont utilisées. Triantafillou (1998) démontre que les composites (carbone, verre, aramide) renforcent efficacement le cisaillement des poutres en béton. L'hybridation lin-carbone optimise à la fois les propriétés mécaniques et l'amortissement. [3].

### I.2.3 Composites hybrides :

Les composites hybrides sont des matériaux composites constitués de deux ou plusieurs types de fibres différents, combinées dans une matrice commune.

L'étude de Tossou et al. [4] porte sur le développement de composites hybrides carbone/lin, visant la synergie des propriétés mécaniques élevées des fibres de carbone avec la légèreté et la durabilité des fibres naturelles. La fabrication par moulage sous vide a été optimisée pour assurer une bonne imprégnation de la matrice polymère. Les caractérisations mécaniques révèlent que l'hybridation permet à la fois d'améliorer significativement la résistance mécanique du composite à base de lin et d'augmenter la capacité d'amortissement vibratoire du composite carbone. Cette approche ouvre des perspectives pour des matériaux structuraux performants et durables.

### I.2.4 Valorisation des fibres récupérées :

La valorisation des fibres recyclées constitue une solution prometteuse pour une économie circulaire dans l'industrie des composites. Gopalraj et Kärki [5] ont évalué un procédé innovant de pyrolyse contrôlée ( $X^{\circ}\text{C}$ , atmosphère Y) permettant de récupérer des fibres de carbone/verre tout en préservant leurs propriétés mécaniques. Leurs résultats obtenus dans cette étude démontrent une conservation de 85% de la résistance initiale des fibres carbone malgré une augmentation modérée de rugosité superficielle, une performance mécanique des composites hybrides recyclés : Module d'élasticité réduit de 13%, une baisse de résistance en flexion de 12% et une amélioration de 15% du comportement en fatigue grâce à l'hybridation

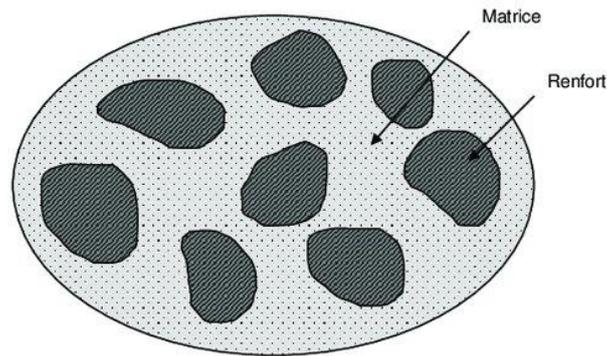
## I.3 Matériaux composites

### I.3.1 Fondements des matériaux composites

Un matériau composite résulte de la combinaison de deux ou plusieurs constituants de nature différente. Cette association complémentaire donne naissance à un matériau aux propriétés améliorées, souvent supérieures à celles de chacun des composants pris individuellement [6].

### I.3.2 Caractéristique Générale

En général, un matériau composite se caractérise par la présence d'une ou plusieurs phases discontinues réparties régulièrement dans une phase continue. Généralement, la phase discontinue se présente sous forme de particules ou de fibres appelées « renfort ou matériau renforçant », possédant des caractéristiques mécaniques supérieures à celles de la phase continue, qui se manifeste sous forme de résine (polyester, époxyde, etc.). On désigne la phase continue par le terme matrice [6].



**Figure I- 1:** Schéma de principe d'un matériau composite.

Les performances des matériaux composites sont étroitement liées aux propriétés intrinsèques de leurs composants, telles que (le module d'élasticité, la résistance mécanique et la fraction volumique), de l'architecture du renfort (distribution, orientation, anisotropie), et des propriétés interfaciales (adhésion, transfert de charge) [6].

Les composites performants doivent combiner :

- Une densité optimisée ( $<1,8 \text{ g/cm}^3$ ) permettant un ratio résistance spécifique/rigidité élevé ( $E/\rho > 100 \text{ GPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$ ),
- Une excellente résistance à la fatigue (coefficient de fatigue  $R=0,1$ ,  $N>10^6$  cycles à  $70\% \sigma_{\text{max}}$ ),
- Une inertie chimique (stabilité en milieu agressif pH 2-12),
- Des propriétés diélectriques (rigidité diélectrique  $>20 \text{ kV/mm}$ )
- Une tolérance aux impacts modérée ( $\text{GIC} \approx 300 \text{ J/m}^2$ ).

Ces caractéristiques résultent de la synergie entre une matrice polymère et des renforts fibrés continus, avec un contrôle précis de l'interface par traitement de surface [6].

### I.3.3 Constituants fondamentaux des matériaux composites

Un composite est essentiellement formé d'une matrice, généralement une résine, et d'un renfort, souvent constitué de fibres.

#### I.4 Les résines:

Les résines sont des polymères (naturels, artificiels ou synthétiques) servent de matrice dans les composites structuraux, assurant la cohésion mécanique par adhésion interfaciale, la protection des renforts contre les agents environnementaux, et la dissipation d'énergie via leur comportement viscoélastique.

#### I.4.1 .Type de résine :

Les résines se répartissent en deux types principaux : les thermodurcissables et les thermoplastiques.

##### I.4.1.1 Résines thermodurcissables :

Les résines thermodurcissables sont largement employées dans l'industrie des composites. Après leur polymérisation, elles deviennent infusibles et insolubles, ce qui les rend irréversiblement rigides. Une fois durcies, elles ne peuvent plus être remoulées ni modifiées. De plus, même sous l'effet des températures très élevées, la résine ne peut pas revenir à son état d'origine (liquide ou pâteux) [7].

Plusieurs classifications existent :

##### I.4.1.1.1 Résine epoxy :

Les résines époxy sont des polymères thermodurcissables qui ont la caractéristique de durcir de manière irréversible en réponse à la chaleur ou par ajout d'un réactif. Elles se distinguent parmi les matières plastiques courants grâce à leur adaptabilité dans les usages industriels. Elles sont utilisées comme matériau de surface ou de structure [8].

Les résines époxy se distinguent par une combinaison unique de ces propriétés [9] :

- Une adhérence élevée (>20 MPa) sur multiples substrats
- Une ductilité (5-8% d'allongement) et résistance aux chocs
- Une stabilité chimique (pH jusqu'à 12) et dimensionnelle
- Une Sensibilité UV nécessitant des stabilisants
- Une performance diélectrique (>20 kV/mm)

Les résines époxy trouvent des applications variées dans de nombreux secteurs industriels en raison de leurs propriétés polyvalentes. Dans le domaine des revêtements, elles sont utilisées pour les peintures industrielles et de sols, offrant une excellente adhésion sur métal et béton, ainsi qu'une résistance à la corrosion et aux milieux hostiles.

L'industrie aéronautique et automobile les emploie pour le collage structural et les composites, tandis que le secteur électrique et électronique les utilise pour l'isolation haute tension, l'enrobage de composants et la fabrication de circuits imprimés.

Les applications sportives incluent les équipements haut de gamme (skis, raquettes, cadres de vélos en carbone). Enfin, leurs propriétés chimiorésistantes et leur durabilité les rendent indispensables pour la réparation d'infrastructures (barrages, ponts) et les revêtements de protection agressive.

#### I.4.1.1.2 Résine polyester :

Les résines polyesters sont des thermodurcissables à durcissement à température ambiante, offrant une excellente maniabilité et un coût compétitif [11]. Leur formulation liquide présente une coloration variable de l'incolore au jaune pâle, avec des propriétés rhéologiques similaires à l'huile de ricin ( $\eta \approx 0.6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ) [11].

Les résines polyester [12,13] se distinguent par leurs propriétés techniques remarquables, notamment une excellente résistance chimique et aux intempéries, une dureté élevée, une bonne stabilité chromatique et une résistance aux taches. Ces caractéristiques en font des matériaux de choix pour diverses applications industrielles telles que les revêtements anticorrosion et isolants électriques, la construction navale (coques de bateaux), la fabrication de pièces automobiles (carrosseries, spoilers), la réalisation de structures composites (bâtiments, réservoirs) ainsi que pour des créations artistiques (sculptures, objets décoratifs). Leur polyvalence et leur durabilité en font des matériaux particulièrement adaptés aux environnements exigeants.

#### I.4.1.1.3 Résine polyuréthane

Les résines polyuréthane, constituées de molécules organiques, offrent une flexibilité supérieure aux résines époxy ainsi qu'une résistance exceptionnelle aux chocs et aux variations thermiques. Leurs propriétés techniques incluent une robustesse mécanique élevée (résistance à la compression/traction), une excellente malléabilité avant durcissement, une forte résistance à l'abrasion, de bonnes performances d'isolation thermique et phonique, et une étanchéité remarquable aux fluides. Ces caractéristiques en font des matériaux polyvalents pour diverses applications : revêtements protecteurs (résistants aux UV et aux intempéries), adhésifs haute performance (collage multi-substrats), laques et peintures durables, pièces moulées résistantes aux chocs, finitions de sols industriels (résistance à l'usure), ainsi que pour la fabrication de semelles de chaussures (souplesse et légèreté). Leur adaptabilité aux conditions extérieures comme intérieures en fait des matériaux de choix pour les secteurs du bâtiment, de l'industrie et de la fabrication [14].

#### I.4.1.1.4 Résine vinylester

Les résines vinylester, des polymères thermodurcissables contenant des groupes ester réactifs, combinent une excellente résistance chimique, des propriétés mécaniques supérieures et une durabilité exceptionnelle. Leurs caractéristiques techniques incluent : une résistance élevée aux agents corrosifs, de bonnes performances mécaniques, une adhérence optimale aux substrats, un faible retrait au durcissement, une stabilité thermique remarquable et une tenue aux

intempéries/UV. Ces propriétés en font des matériaux idéaux pour diverses applications industrielles exigeantes : équipements de traitement chimique (réservoirs, tuyauteries, épurateurs), construction navale (coques de bateaux), pièces automobiles (carrosseries, pare-chocs), infrastructures (ponts, éléments structuraux), équipements sportifs/haut de gamme, ainsi que pour des composants électriques/électroniques (isolation, circuits imprimés). Leur polyvalence et leur résistance en milieux agressifs en font des solutions privilégiées pour les environnements techniques exigeants [15].

#### I.4.1.1.5 Résine acrylique

Les résines acryliques, des polymères synthétiques transparents, se caractérisent par leur durabilité, leur résistance aux intempéries (eau, UV) et leurs propriétés esthétiques (brillance élevée, stabilité chromatique), avec des applications dans les revêtements architecturaux, la finition de meubles et les produits grand public. Contrairement aux thermodurcissables, les résines thermoplastiques (PE, PS, nylon, ABS) offrent une procédabilité réversible par chauffage, permettant le remodelage et le recyclage, ce qui les rend idéales pour les pièces techniques produites en série. Bien que représentant une part minoritaire des PMC, leurs propriétés adaptatives et leur écoresponsabilité en font des solutions prometteuses pour diverses applications industrielles.

#### I.4.1.2 Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques représentent une part relativement faible de l'industrie des PMC. Ces résines sont des matières solides qui ne réagissent pas. Le produit final peut être fabriqué en utilisant la chaleur et la pression. À l'opposé des résines thermodurcissables, les résines thermoplastiques peuvent habituellement être chauffées et reformées si besoin ( polyéthylène, le polystyrène, le nylon, le polycarbonate) [7].

### I.5 Les fibres

Une fibre est un filament de matière mince et étendu ayant typiquement un diamètre de quelques microns (7-30  $\mu\text{m}$ ) et présentant un rapport longueur/diamètre allant de cent à pratiquement infini pour les fibres continues [17].

Les fibres constituent une forme matérielle aux propriétés exceptionnelles. Sous cette forme, les matériaux développent une résistance et une rigidité bien supérieures à leur état massif [17]. Les renforts pour matériaux composites doivent répondre à plusieurs exigences clés. Premièrement, ils doivent présenter des caractéristiques mécaniques élevées (résistance à la traction, rigidité) pour assurer la performance structurale du composite. Deuxièmement, une masse volumique faible est essentielle pour obtenir un rapport résistance/poids optimal,

particulièrement important dans les applications aéronautiques et automobiles. La compatibilité avec la matrice polymère est cruciale pour garantir une bonne adhésion interfaciale et un transfert de charge efficace. Enfin, des considérations pratiques comme la facilité de mise en œuvre et le coût raisonnable influencent directement leur adoption industrielle.

Les renforts sont disponibles dans plusieurs configurations géométriques sur le marché, notamment :

- Sous forme linéaire (fils, mèches, etc.) ;
- Sous forme de structures planes (tissus, mats, etc.) ;
- Sous forme à orientation multiple (tresses, textiles complexes, etc.)

### I.5.1 Types de fibres

#### I.5.1.1 Fibres de verre

Connues également sous le nom de fiberglass, les fibres de verre sont fabriquées à partir d'oxydes minéraux tels que la silice, l'alumine, la chaux, la magnésie ou encore l'oxyde de bore. Elles se caractérisent par leur légèreté, très résistante et robuste. Bien que cette fibre est moins performante mécaniquement que la fibre de carbone, cette alternative offre une meilleure résilience et un coût bien inférieur, tout en surpassant les métaux en termes de rapport résistance/poids. Sa facilité de mise en œuvre par procédés de moulage en fait un matériau compétitif pour diverses applications industrielles .



**Figure I- 2:** Présentation morphologique des fibres de verre.

##### I.5.1.1.1 Propriétés de la fibre de verre

Ces fibres se caractérisent par une combinaison optimale de propriétés mécaniques et fonctionnelles. Leur faible densité (2,5-2,7 g/cm<sup>3</sup>) en fait des renforts légers, tandis que leur résistance mécanique ( $R_m \approx 1\,500\text{-}3\,000$  MPa) reste compétitive malgré des performances inférieures à la fibre de carbone. Elles présentent d'excellentes propriétés isolantes (conductivité

thermique  $\approx 1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , rigidité diélectrique  $> 20 \text{ kV/mm}$ ) et une bonne résilience aux chocs (énergie de rupture  $> 50 \text{ kJ/m}^2$ ). Leur mise en forme aisée par procédés standards (moulage, stratification) et leur comportement moins fragile que les fibres carbone (allongement à rupture  $\approx 3\text{-}5\%$ ) en font des matériaux polyvalents pour des applications exigeant un compromis entre performance, durabilité et facilité de transformation.

#### I.5.1.1.2 . Domaine d'application [18]

- Production de tissus pour l'usage domestique en décoration et mobilier
- Confection de vêtements et de produits textiles
- Production de pneus et de plastiques à renforts fibreux
- Utilisation dans les conduits d'échappement
- Les coques et sièges de bateaux
- Les cannes à pêche

#### I.5.1.2 Fibres de Carbone

Également connue sous les noms de fibre de graphite ou graphite de carbone, la fibre de carbone est formée de filaments extrêmement fins composés majoritairement de carbone. Elle se distingue par ses performances élevées. Les fibres de carbone sont fabriquées à partir de deux précurseurs principaux : le PAN (polyacrylonitrile) et le brai, ou d'autres fibres organiques de base. Les atomes de carbone sont liés entre eux sous forme de microcristaux, qui sont plus ou moins alignés parallèlement à l'axe de la fibre. Cet alignement cristallin confère à la fibre une résistance exceptionnelle [19].



**Figure I- 3:** Présentation morphologique des fibres de Carbon.

#### I.5.1.2.1 Propriétés de la fibre de Carbon

- **Forte Résistance à la Traction** : Plus résistante que l'acier tout en étant beaucoup plus légère.
- **Grande Rigidité** : Excellente rigidité grâce à la structure microcristalline alignée.
- **Bonne Résistance à la Fatigue** : Conserve ses performances sous des contraintes répétées.
- **Haute Résistance Chimique** : Insensible à la plupart des produits chimiques et à la corrosion.

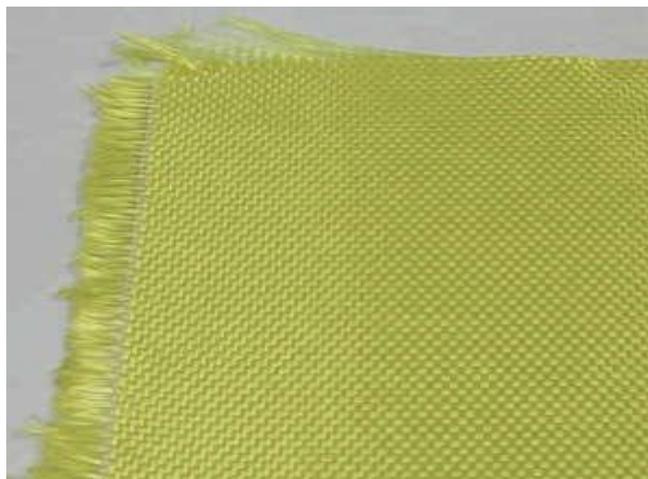
#### I.5.1.2.2 Domaine d'application [19] :

Ces fibres trouvent des applications stratégiques dans plusieurs secteurs industriels clés :

- Industrie Aérospatiale : Employée dans les structures d'avions pour réduire le poids et améliorer les performances.
- Industrie Automobile : Utilisée dans les véhicules haute performance et électriques
- Équipements Sportifs : Présente dans les vélos, raquettes de tennis.

#### I.5.1.3 Fibres de kevlar :

Est une fibre organique appartenant à la famille des polyamides aromatiques (aramides). Il est reconnu pour sa combinaison unique de haute résistance, de rigidité (module élevé), de ténacité et de stabilité thermique [20].



**Figure I- 4:** Présentation morphologique des fibres de kevlar.

#### I.5.1.3.1 Propriétés de la fibre de kevlar

Ces fibres présentent des caractéristiques remarquables, notamment une résistance à la rupture plusieurs fois supérieure à celle d'un fil d'acier, combinée à un module de traction élevé

dépassant celui de l'acier et de la fibre de verre. Leur stabilité thermique se distingue par une excellente tenue en température et un retrait négligeable sous sollicitation thermique. Enfin, leur résistance à la corrosion leur confère une durabilité exceptionnelle, même en environnements humides ou agressifs, sans dégradation notable de leurs propriétés mécaniques [20].

#### I.5.1.3.2 Domaine d'application [20] :

Ces fibres trouvent des applications stratégiques dans les secteurs :

- D'automobile ou elles Renforcent les plaquettes de frein, embrayages et blindages de véhicules pour plus de sécurité et de durabilité.
- D'aérospatiale : Maritime & Ferroviaire : renforce les avions et trains
- De la Protection Balistique que sont Utilisées dans les casques militaires et systèmes de blindage pour une protection vitale.
- D'industrie & Ingénierie ou elles Renforcent les joints, cordes, câbles et fibres optiques pour résister aux conditions extrêmes.
- D'équipements Sportifs & Vêtements ou elles Améliorent la résistance et la sécurité des articles de sport et vêtements de protection.

#### I.5.1.4 Fibres de Polyéthylène :

Le polyéthylène est un thermoplastique. Sa température de transition vitreuse ( $T_g$ ) est d'environ 120 °C. Sa température de fusion ( $T_m$ ) dépend de sa structure et varie entre 108 et 132 °C. Il s'agit d'un alcane de masse moléculaire élevée offrant une bonne résistance aux attaques chimiques. Étant un matériau cristallin qui n'interagit pas avec les liquides [21].



**Figure I- 5:** Présentation morphologique des fibres de Polyéthylène .

#### I.5.1.4.1 Propriétés de la fibre de Polyéthylène [21] :

Ces fibres de hautes performances combinent une résistance exceptionnelle (module de traction élevé et ténacité 10-15 fois supérieure à l'acier) avec une capacité d'absorption d'énergie remarquable. Leur structure aliphatique cristalline leur confère une excellente résistance chimique aux agents agressifs, tandis que leurs propriétés mécaniques (résistance à l'abrasion, à la fatigue) rivalisent avec les polyamides et polyesters, en maintenant une stabilité dimensionnelle optimale.

#### I.5.1.4.2 Domaine d'application [21] :

Principalement utilisées dans les composites structurels (coques navales, équipements sportifs, boucliers pare-balles), ces fibres servent également au renforcement du béton (limitation de la fissuration) et aux textiles techniques (vêtements de protection, filets de pêche haute résistance). Leurs caractéristiques uniques en font des solutions idéales pour les applications exigeant légèreté, durabilité et résistance aux chocs.

#### I.5.1.5 Fibres de polypropylène :

Le polypropylène (PP) est un thermoplastique. La fibre de polypropylène a été introduite dans le secteur textile dans les années 1970 et est devenue un membre important de la famille en pleine expansion des fibres synthétiques [22].

##### I.5.1.5.1 Propriétés de la fibre de polypropylène :

Ces fibres synthétiques présentent une excellente résistance chimique (acides, alcalis) et à l'abrasion, combinée à une immunité biologique (insectes, parasites). Leur faible absorption d'humidité (<0,1%) et leur facilité de transformation (extrusion, moulage) en font une solution économique pour des applications durables, avec des propriétés mécaniques équilibrées et un coût compétitif [22].

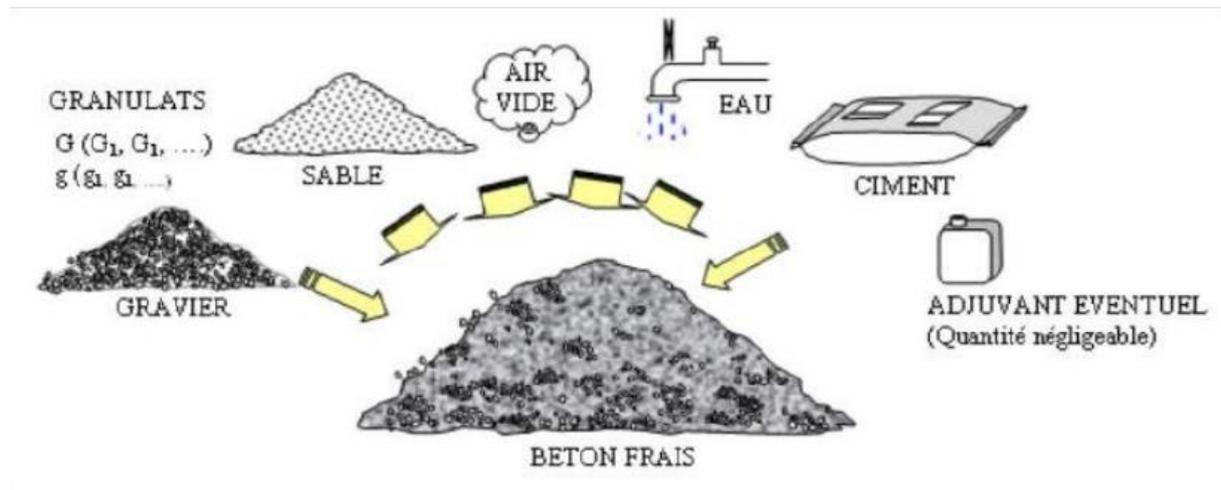
##### I.5.1.5.2 Domaine d'application :

Elles sont principalement utilisées dans les revêtements industriels (sols résistants), les bétons performants (renforcement structural), les éléments préfabriqués et mortiers spéciaux, améliorant la résistance aux fissures, la flexibilité et la durabilité dans des conditions environnementales sévères. Leurs caractéristiques uniques répondent aux exigences des constructions modernes et des milieux industriels agressifs [22].

## I.6 Le béton :

Le béton, matériau composite clé en génie civil, associe une matrice cimentaire à des granulats (sable, gravier) pour obtenir des propriétés mécaniques optimales. Sa formulation adaptable permet de moduler résistance, durabilité et ouvrabilité selon les exigences structurelles, tandis

que sa mise en œuvre plastique facilite les techniques de chantier (vibration, coffrage) en réduisant les coûts. Le strict respect des normes et des contrôles qualité en fait un matériau fiable et performant pour des infrastructures durables, alliant robustesse, efficacité économique et polyvalence d'application [23].



**Figure I- 6:** Les principales matières utilisées dans le béton .

#### I.6.1 Constituants du béton :

Le béton est un matériau composite, que l'on obtient par un mélange de ciments, de granulats, d'eau et éventuellement d'adjuvants. Ces composants ont des caractéristiques mécaniques différentes [23].



**Figure I- 7:** Photographie d'un matériau en béton [23]

### I.6.1.1 Le ciment

En génie civil, le ciment, liant hydraulique normé (NF EN 197-1/CP NF EN 206), constitue la phase active déterminant les caractéristiques mécaniques et la durabilité des bétons structurels. Sa composition optimisée - clinker, additions (laitier, cendres) et régulateurs de prise - influence directement la cinétique d'hydratation, la résistance et le comportement rhéologique des bétons, tandis que son choix technique s'effectue selon les exigences du projet : résistance précoce, faible chaleur d'hydratation, ou résistance chimique. Le contrôle qualité systématique (finesse Blaine, stabilité dimensionnelle, compatibilité adjuvants) et le respect des normes garantissent des performances adaptées aux applications structurales, tout en répondant aux enjeux économiques et environnementaux inhérents à la conception des ouvrages durables [23].

### I.6.1.2 L'eau

Il est crucial de prêter une attention spéciale à la proportion d'eau dans le gâchage. Cette proportion doit être attentivement observée, car un excès d'eau augmente la porosité du béton, ce qui change ses caractéristiques mécaniques et sa durabilité [23].

### I.6.1.3 Granulats

Les granulats, qui constituent deux tiers du volume du béton, sont indispensables. Ils sont classifiés en fonction de leur granulométrie, qui est la distribution des tailles des grains en fines, sables, gravillons et cailloux. Les granulats possèdent des caractéristiques propres qui proviennent de la roche à partir de laquelle ils sont extraits, comme la couleur et les propriétés mécaniques et physico-chimiques [23].

On distingue généralement deux catégories de granulats :

- Le gros granulat telles les pierres et graviers concassés ou roulés, généralement refusés au tamis de 5mm ;
- Les granulats fins, tel le sable naturel, passant largement à 5mm.

le granulat doit être durable et chimiquement stable, c'est-à-dire qu'il ne doit pas réagir avec le liant et que sa contribution à la résistance se limite à la densité qu'il apporte [23].

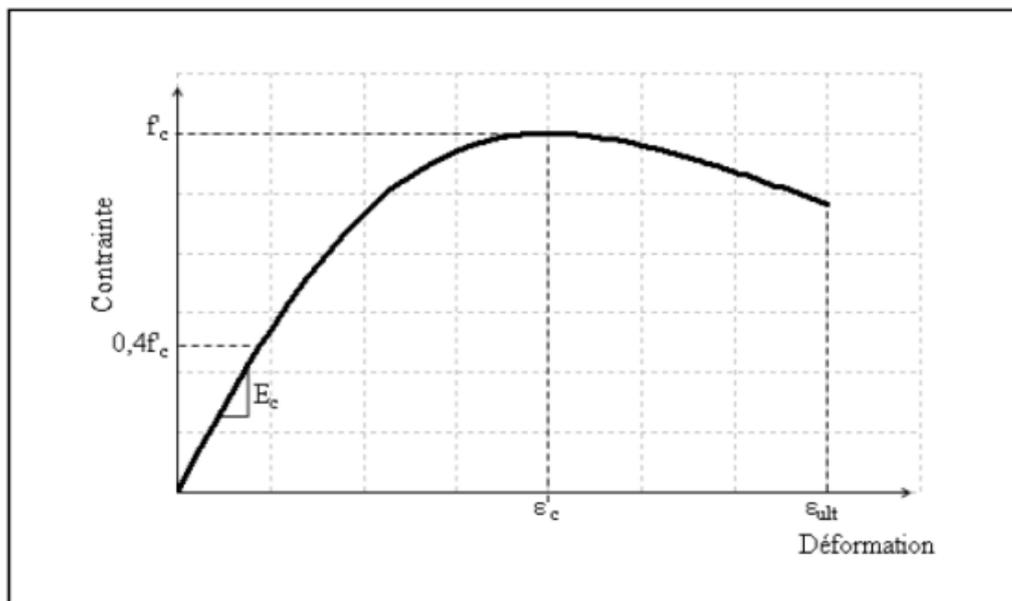
### I.6.1.4 Adjuvants :

Les adjuvants, additifs régis par la norme NF EN 934-2, sont des composés chimiques hautement spécialisés qui modifient de manière ciblée les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton. Ajoutés pendant le malaxage, en petites quantités lors de la confection, visant à optimiser certaines propriétés du matériau [23].

## I.6.2 Comportement mécanique du béton :

### I.6.2.1 béton en compression :

La relation contrainte-déformation non linéaire caractérise principalement le comportement du béton sous compression, bien que ses composants incluent des matériaux à la fois élastiques et fragiles tels que les granulats et la pâte de ciment. En outre, il démontre une forme de pseudo-ductilité associée à l'apparition de microfissures dans le matériau. Effectivement, lorsque la pression exercée sur le béton dépasse 40% de sa capacité en compression, des microfissures apparaissent et se diffusent parallèlement à l'accroissement de la charge [23].



**Figure I- 8:** Relation contrainte-déformation du béton soumis à une charge statique en compression.

### I.6.2.2 Béton en traction :

Le béton montre une caractéristique particulière quand il est exposé à une force de traction, où l'on remarque un développement uniforme et constant de fissures se propageant perpendiculairement au sens de la charge. Cette caractéristique établit une corrélation presque linéaire et en relation directe avec le module d'élasticité du béton. Bien que la résistance à la compression soit un indicateur fiable, elle ne garantit pas nécessairement une relation directe avec la résistance à la traction [23].

La relation (I.1) conventionnellement établit la résistance caractéristique à la traction du béton à  $j$  jours, représentée par  $f_{tj}$ , en fonction de la résistance à la compression  $f_{cj}$ .

$$f_{tj} = 0,6 + 0,006f_{cj} \quad (I.1)$$

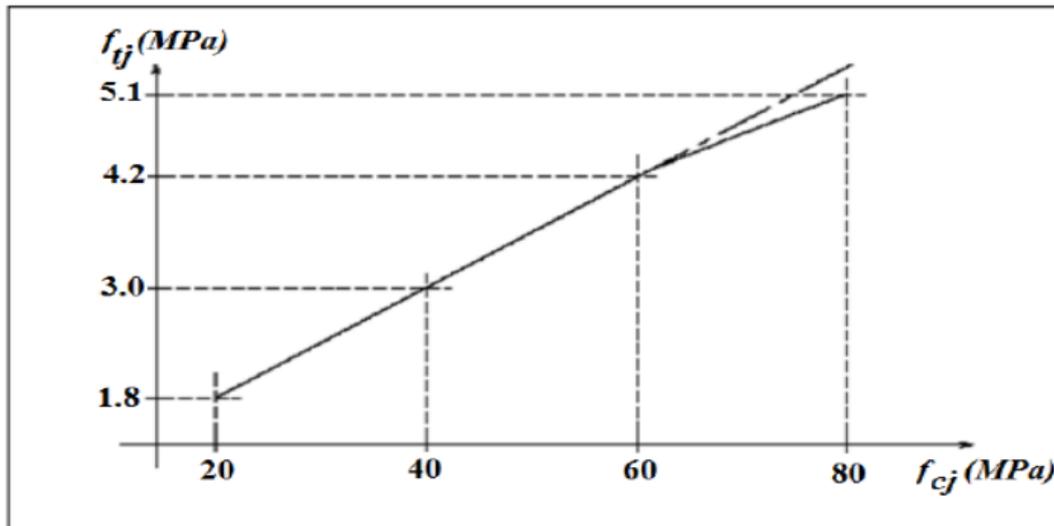


Figure I- 9: Evolution de la résistance à la traction  $f_{tj}$  en fonction de celle

#### I.7 Conclusion partielle:

Ce chapitre présente une étude bibliographique qui vise à établir les bases théoriques de notre travail. Il se compose de deux parties : la première expose l'état de connaissance sur les matériaux composites pour le renforcement des structures et les différents types de fibres, tandis que la seconde s'intéresse aux matériaux utilisés, notamment aux composites à fibres et au béton, ainsi qu'à leurs propriétés. Cette revue permet de mieux comprendre les choix techniques adoptés dans le cadre de ce mémoire.

***CHAPITRE II :***  
***PARTIE***  
***EXPIREMENTALE.***

## II.1 Introduction :

Ce chapitre présente l'ensemble des démarches expérimentales entreprises dans le cadre de notre travail. Le processus a débuté par la préparation des éprouvettes de béton, en passant par les essais d'identification des matériaux. Ensuite, on a préparé les fibres et les éprouvettes en résine époxy non renforcée et renforcée pour être soumises à des essais de traction. Ces essais ont joué un rôle clé pour sélectionner les dimensions et les pourcentages les plus adaptés à l'élaboration des plaques pour renforcer les structures.

## II.2 Fabrication des éprouvettes en béton :

Cette partie porte sur la mise en œuvre des échantillons en béton, une phase préparatoire cruciale dans le déroulement de notre étude expérimentale. Son objectif est de garantir des échantillons cohérents et conformes aux exigences normatives.

Les principaux constituants de béton sont les suivant :

- **Gravier** : Ce travail a été réalisé en utilisant des granulats concassés de fractions 3/8 et 8/15 provenant d'une carrière d'oued el Bardi.



**Figure II - 1:** Graviers 3/8 et 8/15 concassés d'oued el Bardi.

- **Sable** : Au cours de ce travail de recherche, deux types de sable ont été utilisés : un sable 0/3 issu de la carrière d'Oued El Berdi, ainsi qu'un sable fin provenant de Boussaâda.

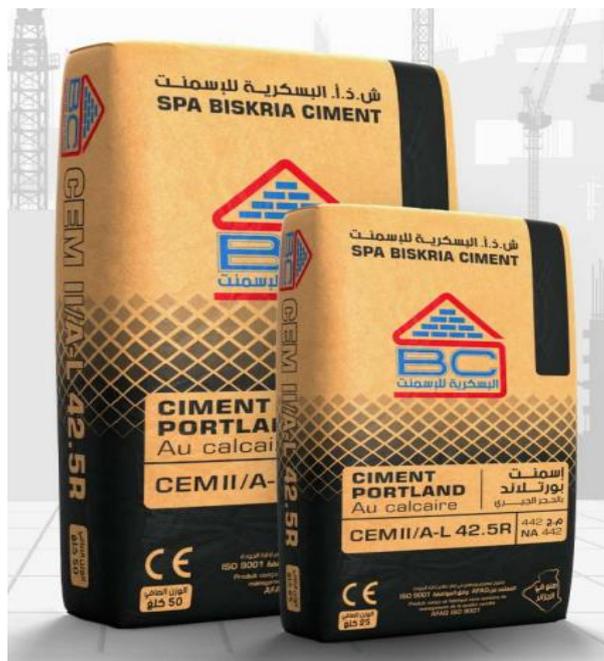


**Figure II - 2:** Sable fin de Boussaâda



**Figure II - 3:** Sable 0/3 d'Oued el Berdi

- **Ciment** : Le ciment employé dans cette étude est un ciment Portland de type CEM II/A-L 42,5 R, conforme à la norme algérienne NA 442-2013, fourni par la cimenterie de Biskra.



**Figure II - 4 :** Vue du ciment Portland employé : type CEM II/A-L 42,5 R

- **Eau** : L'eau utilisée pour le gâchage est celle du réseau d'alimentation en eau potable du laboratoire de génie civil de l'université Akli Mohand Oulhadj de Bouira (pôle universitaire)."

Tableau II - 1: Analyses chimique de l'eau.

Paramètre	Valeur
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	130,28 mg/L
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	97,05 mg/L
Sodium (Na <sup>+</sup> )	94 mg/L
Potassium (K <sup>+</sup> )	1,1 mg/L
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	262,4 mg/L
Ph	7,19

- **Adjuvants** : Nous avons utilisé un superplastifiant haut réducteur d'eau de nouvelle génération pour béton provenant de la société Sika.

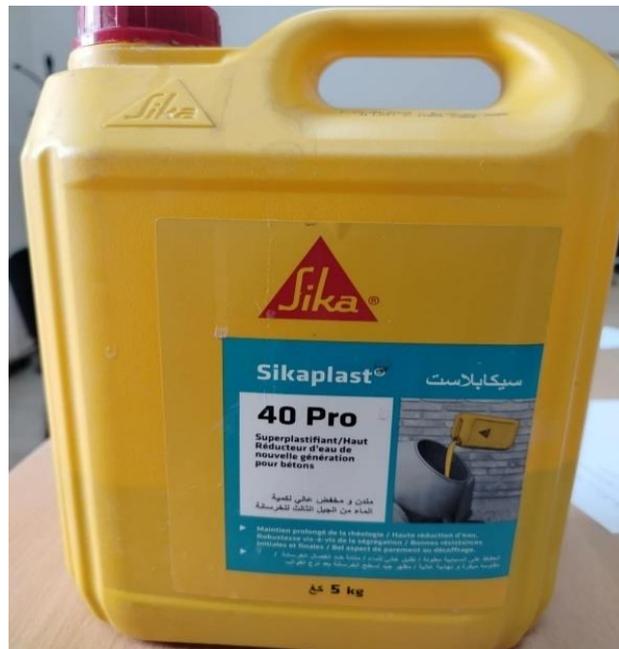


Figure II - 5: Superplastifiant haut réducteur d'eau.

## II.2.1 . Essai d'identification et caractérisation des matériaux :

### II.2.1.1 Analyse granulométrique : (selon la norme NF P 18-560)

L'analyse granulométrique a pour objectif d'identifier la taille des grains ainsi que leur répartition en pourcentage massique dans un échantillon.



**Figure II - 6:** tamiseuse électrique

## II.2.1.1.1 . Gravier :

Pour le gravier 3/8, la série de tamis utilisée est : fond, 0.08, 0.125, 0.5, 1, 1.6, 3.15, 5, 8 et 10

La quantité de l'échantillon est de 1 Kg.

**Tableau II - 2: Analyse granulométrique du gravier 3/8.**

<i>Module</i>	<i>Refus partiel(g)</i>	<i>Refus cumulés (g)</i>	<i>Refus cumulés (%)</i>	<i>Tamisât (%)</i>
10	2	2	0.2	99.5
8	15	17	1.7	98.3
5	496	513	51.3	48.7
3.15	365	878	87.8	12.2
1.6	88	966	96.6	3.4
1	15	981	98.1	1.9
0.5	8	989	98.9	1.1
0.125	6	995	99.5	0.5
0.08	4	999	99.9	0.1
<i>Fond</i>	0	999	99.9	0.1
<i>TOTAL</i>	/	999	/	/

gravier 8/15 : série de tamis est : fond, 6.3, 8, 10, 12.5, 14, 16 et 20 . échantillon est de 1 Kg.

**Tableau II - 3: Analyse granulométrique du gravier 8/15.**

<i>Module</i>	<i>Refus partiel(g)</i>	<i>Refus cumulés (g)</i>	<i>Refus cumulés (%)</i>	<i>Tamisât (%)</i>
20	0	0	0	100
16	33	33	3.3	96.7
14	32	65	6.5	93.5
12.5	134	199	19.9	80.1
10	292	491	49.1	50.9
8	323	814	81.4	18.6
6.3	151	965	96.5	3.5
<i>Fond</i>	33	998	99.8	<b>0.2</b>
<i>TOTAL</i>	/	998	/	/

**II.2.1.1.2 Sable :**

Pour le sable 0/3, la série de tamis utilisée est : fond, 0.08, 0.125, 0.5, 1, 1.6, 3.15, 4 et 5, La quantité de l'échantillon est de 1 Kg.

**Tableau II - 4: Analyse granulométrique du sable 0/3.**

<i>Module</i>	<i>Refus partiel(g)</i>	<i>Refus cumulés (g)</i>	<i>Refus cumulés (%)</i>	<i>Tamisât (%)</i>
5	34	34	3.4	96.6
4	135	169	16.9	83.1
3.15	115	284	28.4	71.6
1.6	256	540	54	46
1	216	756	75.6	24.4
0.5	124	880	88	12
0.125	94	974	97.4	2.86
0.08	21	995	99.5	0.5
Fond	3	998	99.8	0.1
TOTAL	/	998	/	/

sable fin, la série des tamis: fond, 0.063, 0.08, 0.125, 0.5 et 2, pour échantillon de 1 Kg.

**Tableau II - 5: Analyse granulométrique du sable fin.**

<i>Module</i>	<i>Refus partiel(g)</i>	<i>Refus cumulés (g)</i>	<i>Refus cumulés (%)</i>	<i>Tamisât (%)</i>
2	1	1	0.1	99.9
1	2	3	0.3	99.7
0.5	6	9	0.9	99.1
0.125	862	871	78.1	12.9
0.08	119	990	99	1
0.063	1	991	99.1	0.9
Fond	4	995	99.5	0.5
TOTAL	/	995	/	/

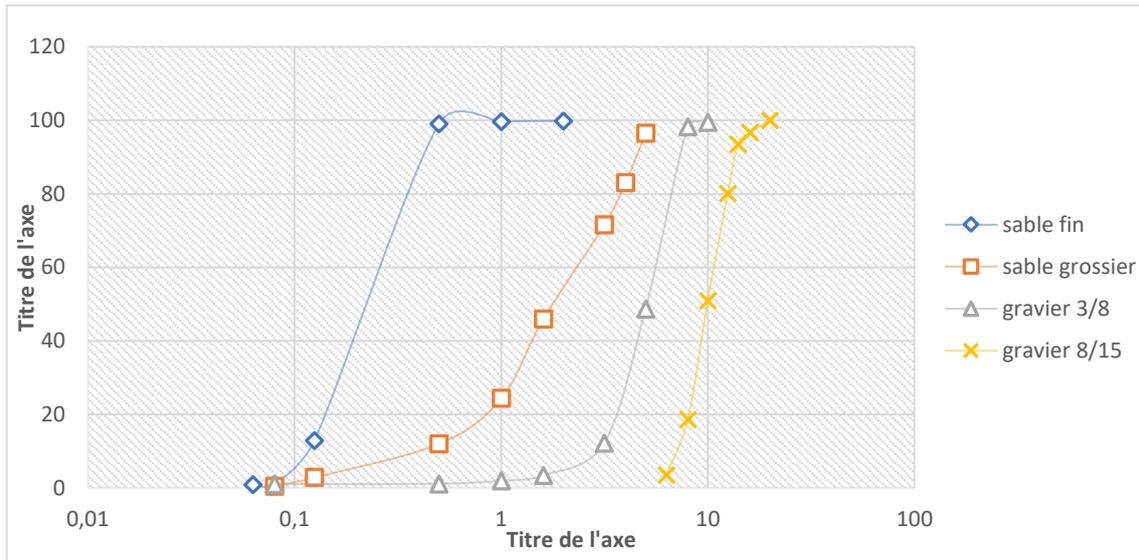


Figure II - 7: Courbes granulométrique des échantillons.

❖ **Module de finesse du sable : (EN 12620)**

$$M_f = \frac{1}{100} \times \sum \text{réfus cumulés}(0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 5)$$

$$M_f = 2.813$$

D'après la norme européenne **EN 12620**, le module de finesse obtenu est entre 2.8 et 3.3, donc on peut conclure que notre sable est un peu grossier.

### II.2.1.2 La masse volumique : (NF EN 1097-6)

#### II.2.1.2.1 . Masse Volumique apparente :

C'est la masse de l'unité de volume apparente du corps ; c'est à-dire, du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

#### Principe :

Remplir un récipient d'un volume connu, et en déterminer la masse.

La masse volumique apparente :

$$\rho_{app} = \frac{M_2 - M_1}{V}$$

Avec :

$M_2$  : masse de l'échantillon + récipient

$M_1$  : masse récipient

$V$  : volume de récipient

## ❖ Gravier :

Tableau II - 6: Masse volumique apparente du gravier 3/8.

	<b>M<sub>2</sub>(g)</b>	<b>M<sub>1</sub>(g)</b>	<b>V (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ρ (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Essai 01</b>	2199	664	1031	1.488
<b>Essai 02</b>	2196	664	1031	1.485
<b>Essai 03</b>	2194	664	1031	1.483
<b>La moyenne</b>	/	/	/	<b>1.485</b>

Tableau II - 7: Masse volumique apparente du gravier 8/15.

	<b>M<sub>2</sub>(g)</b>	<b>M<sub>1</sub>(g)</b>	<b>V (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ρ (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Essai 01</b>	2077	664	1031	1.37
<b>Essai 02</b>	2078	664	1031	1.371
<b>Essai 03</b>	2092	664	1031	1.385
<b>La moyenne</b>	/	/	/	<b>1.375</b>

## ❖ Sable :

Tableau II - 8: Masse volumique apparente du sable 0/3.

	<b>M<sub>2</sub>(g)</b>	<b>M<sub>1</sub>(g)</b>	<b>V (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ρ (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Essai 01</b>	2287	664	1031	1.574
<b>Essai 02</b>	2286	664	1031	1.573
<b>Essai 03</b>	2273	664	1031	1.56
<b>La moyenne</b>	/	/	/	<b>1.569</b>

Tableau II - 9: Masse volumique apparente du sable fin.

	<b>M<sub>2</sub>(g)</b>	<b>M<sub>1</sub>(g)</b>	<b>V (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ρ (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Essai 01</b>	2204	664	1031	1.493
<b>Essai 02</b>	2191	664	1031	1.481
<b>Essai 03</b>	2192	664	1031	1.482
<b>La moyenne</b>	/	/	/	<b>1.485</b>

## II.2.1.2.2 Masse Volumique absolue :

La masse volumique absolue correspond à la masse d'un matériau rapportée à son volume réel, excluant tout vide entre les particules. Elle peut être déterminée à l'aide d'une éprouvette graduée, selon les étapes suivantes :

- Remplir l'éprouvette avec un liquide neutre par rapport à l'échantillon, jusqu'au volume initial noté  $V_1$  ;
- Ajouter une masse  $M$  de l'échantillon dans l'éprouvette ;
- Relever le nouveau volume du liquide, désigné par  $V_2$ .

La masse volumique absolue :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

❖ Gravier :

**Tableau II - 10: Masse volumique absolue du gravier 3/8.**

	M(g)	V <sub>1</sub> (g)	V <sub>2</sub> (cm <sup>3</sup> )	ρ (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Essai 01</b>	500	300	495	2.564
<b>Essai 02</b>	500	300	498	2.525
<b>Essai 03</b>	500	300	499	2.512
<b>La Moyenne</b>	/	/	/	<b>2.533</b>

**Tableau II - 11: Masse volumique absolue du gravier 8/15.**

	M(g)	V <sub>1</sub> (g)	V <sub>2</sub> (cm <sup>3</sup> )	ρ (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Essai 01</b>	400	300	460	2.5
<b>Essai 02</b>	400	300	460	2.5
<b>Essai 03</b>	400	300	460	2.5
<b>La moyenne</b>	/	/	/	<b>2.5</b>

## ❖ Sable :

**Tableau II - 12:** Masse volumique absolue du sable 0/3.

	<b>M(g)</b>	<b>V<sub>1</sub>(g)</b>	<b>V<sub>2</sub> (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ρ (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Essai 01</b>	500	400	600	2.5
<b>Essai 02</b>	500	400	598	2.512
<b>Essai 03</b>	500	400	599	2.564
<b>La moyenne</b>	/	/	/	<b>2.512</b>

**Tableau II - 13:** Masse volumique absolue du sable fin.

	<b>M(g)</b>	<b>V<sub>1</sub>(g)</b>	<b>V<sub>2</sub> (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ρ (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Essai 01</b>	200	150	235	2.353
<b>Essai 02</b>	200	150	236	2.325
<b>Essai 03</b>	200	150	234	2.380
<b>La moyenne</b>	/	/	/	<b>2.352</b>

## II.2.1.3 Equivalent de sable : (NF P 18-598) :

L'essai d'équivalent de sable est utilisé pour évaluer la propreté d'un sable. Il s'applique à la fraction du granulat passant à travers un tamis de 5 mm à mailles carrées, et permet d'estimer, de manière générale, la teneur et la nature des fines présentes.

L'essai se déroule selon les étapes suivantes :

- Remplir une éprouvette graduée jusqu'au premier repère.
- Introduire environ 120 g de sable, puis laisser l'échantillon au repos pendant 10 minutes.
- Fermer l'éprouvette et la secouer horizontalement 90 fois en effectuant des allers-retours.
- Procéder au lavage du sable avec une solution appropriée, puis laisser décanter durant 20 minutes.
- Relever la hauteur du sable propre (notée h<sub>2</sub>') ainsi que la hauteur totale du sédiment incluant les éléments fins (notée h<sub>1</sub>).

- La lecture précise de  $h_2'$  peut parfois être difficile, d'où la nécessité de déterminer avec soin l'équivalence sable (ES).
- Descendre lentement le piston jusqu'à ce qu'il entre en contact avec le sédiment, le stabiliser, puis mesurer la hauteur  $h_2$ .

Une fois l'essai terminé, l'équivalence sable est calculée par :

$$ESV = \frac{h_2'}{h_1} \times 100$$

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



**Figure II - 8: Test d'équivalence de sable.**

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II - 14: Résultats de l'essai d'équivalence sable (sable 0/3).

	$H1$ (cm)	$H2'$ (cm)	$H2$ (cm)	ESV (%)	ES (%)
<b>Essai 1</b>	10	8.5	7.6	85	76
<b>Essai 2</b>	14.2	9.7	9.2	68.30	64.78
<b>Essai 3</b>	10.2	8.5	7.5	83.33	73.52
<b>Moyenne</b>	/	/	/	<b>78.88</b>	<b>71.43</b>

Tableau II - 15: Résultats de l'essai d'équivalence sable (sable fin).

	$H1$ (cm)	$H2'$ (cm)	$H2$ (cm)	ESV (%)	ES (%)
<b>Essai 1</b>	11	9.9	9.7	90	88.18
<b>Essai 2</b>	11.6	10.3	10	88.79	86.20
<b>Essai 3</b>	11.7	10.6	10.2	90.59	87.17
<b>Moyenne</b>	/	/	/	<b>89.79</b>	<b>87.18</b>

Tableau II - 16: Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalence de sable ESV et Esp.

ES à vue	ES Piston	Nature et qualité du sable
<b>ES &lt; 65</b>	<b>ES &lt; 60</b>	<b>Sable argileux</b> : risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité.
<b>65 ≤ ES &lt; 75</b>	<b>60 ≤ ES &lt; 70</b>	<b>Sable légèrement argileux</b> : de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
<b>75 ≤ ES &lt; 85</b>	<b>70 ≤ ES &lt; 80</b>	<b>Sable propre</b> : faible pourcentage de fines argileuses convenant pour les bétons de haute qualité.
<b>ES ≥ 85</b>	<b>ES ≥ 80</b>	<b>Sable très propre</b> : l'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

D'après les résultats obtenus (voir Tableau II. 10 et II. 11), on a trouvé :

le sable 0/3 ESV = 78.88 % et ES =71.43 %. Donc le sable 0/3 est un sable propre.

le sable fin  $ESV = 89.79\%$  et  $ES = 87.18\%$ . Donc le sable est un sable très propre.

#### II.2.1.4 Début et fin de prise : (NF P 15-473)

Le temps de prise est établi par l'observation de la pénétration d'une aiguille dans une pâte de ciment à consistance normalisée jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur spécifiée.



**Figure II - 9: Essai de prise.**

les résultats de l'essai de prise :

**Tableau II - 17:** Résultats d'essai de début et fin de prise du ciment.

<b>Temps de début de prise</b>	2h40min
<b>Temps de fin de prise</b>	6h

Le temps de début de prise du ciment utilisé est de 2h40min et le temps de fin de prise est de 6h, les résultats obtenus sont conformes à la fiche technique du ciment utilisé.

#### II.2.2 Formulation du béton par la méthode de DREUX-GORISSE :

La formulation du béton peut être réalisée selon différentes méthodes. Dans le cadre de notre étude, nous avons adopté la méthode de DREUX-GORISSE afin de définir les proportions optimales des constituants (eau E, ciment C, sable S, gravier G et gravillons g) nécessaires à la production d'un mètre cube de béton.

*Données de base sur le béton :*

- $f_{c28} = 30 \text{ MPa}$
- *Diamètre maximal des granulats  $D_{max} = 15 \text{ cm}$*
- *Les trois classes granulaires : 0/3,3/8 et 8/15*

- Affaissement envisagé est :  $Aff = 7\text{cm}$
- Serrage : vibration courante
- Masse volumique réelle du ciment :  $Mvc = 3.1$
- Classe vraie du ciment :  $Rc = 42.5\text{ MPa}$
- Béton non pompable

Le tableau suivant présente la composition granulaire des constituants du béton :

**Tableau II - 18: Formulation de béton pour 1m<sup>3</sup>**

Constituants	Masse(kg)	M <sub>vapp</sub> (kg/l)	Volume(l)
Sable fin	396.469	1.485	266.982
Sable grossier	334.349	1.569	213.097
Gravier 3/8	188.436	1.486	130.316
Gravier 8/15	778.665	1.375	588.953
Eau	179.58	1	179.58
Ciment	350	1	350
Adjuvant	7	1	7

### II.2.3 Essai sur béton frais :

L'essai sur béton frais permet de caractériser les propriétés du béton avant sa prise.

#### II.2.3.1 Affaissement au cône d'Abrams : (NF EN 12350-2)

Également appelé *Slump test* (terme emprunté à l'anglais), cet essai consiste à évaluer la consistance du béton frais en utilisant un moule tronconique (diamètre supérieur : 10 cm, diamètre inférieur : 20 cm, hauteur : 30 cm). Le béton est versé en trois couches successives, chacune étant compactée à l'aide d'une tige métallique de 16 mm de diamètre à extrémité arrondie. Chaque couche est piquée 25 fois selon un ordre précis, en répartissant uniformément les coups sur toute la surface. Une fois le moule rempli, on le retire verticalement avec

précaution, sans provoquer de déplacement latéral ni de rotation du béton. L'affaissement mesuré correspond alors à l'affaissement du béton frais [24].

**Tableau II - 19 :**

*Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abram.*

Classe de consistance	Définition	Affaissement en (cm)
S1	Ferme	1 à 4
S2	Plastique	5 à 9
S3	Très plastique	10 à 15
S4	Fluide	16 à 21
S5	Très fluide	≥ 22

Résultat de l'essai :

Affaissement :  $A_{ff} = 8\text{cm}$

la classe de notre béton est S2 (plastique).



**Figure II - 10:** Essai d'affaissement au cône d'Abrams.

#### II.2.4 Confections des éprouvettes en béton

Dans le cadre de notre travail de recherche, plusieurs types d'éprouvettes en béton ont été confectionnées afin de réaliser des essais mécaniques. Des éprouvettes cylindriques de dimensions  $16 \times 32$  cm ont été préparées pour l'évaluation de la résistance à la compression à 28 jours. Parallèlement, des éprouvettes prismatiques de dimensions  $7 \times 7 \times 28$  cm ont été fabriquées pour mener des essais de traction par flexion. Ce même type d'éprouvette a

également été utilisé avec des plaque on résine époxy renforcée pour réaliser les essais de flexion.



**Figure II - 11:** éprouvette cylindrique du béton 16\*32.



**Figure II - 12:** éprouvette prismatique du béton 7\*7\*28.

### II.3 Fabrication des éprouvettes en résine renforcée et non renforcée

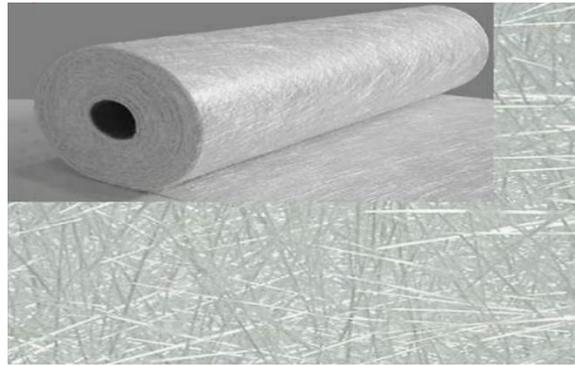
La réalisation d'éprouvettes en résine, qu'elles soient renforcées de fibres ou non, requiert une série d'étapes méthodiques afin d'assurer des échantillons fiables, de qualité homogène et adaptés aux essais mécaniques.

#### II.3.1 Préparation des fibres

il est important de bien choisir les fibres à intégrer dans le mélange, en tenant compte de leurs propriétés et de leur compatibilité avec la résine sélectionnée.

##### II.3.1.1 Mat de fibres de verre

Le mat de fibres de verre utilisé est de type E, se présente comme un rouleau, que l'on découpe à des dimensions de (10 mm et 15 mm) pour l'utiliser dans notre travail.



**Figure II - 13:** Mat de fibres de verre [24].

#### II.3.1.1.1 Caractéristique [24]

- *Masse volumique (g/cm<sup>3</sup>)* : ..... 2.60
- *Coefficient de poisson* : ..... 0.25
- *Force de rupture (MPa)* : ..... 2400
- *Elongation (%)* : ..... 3.50
- *Diamètre (μm)* : ..... 16

#### II.3.1.1.2 Propriété [24]

- Fibres rigides.
- Résistance aux agressions chimiques et naturelles (rayons UV)
- Résistance à la traction élevée

#### II.3.1.2 Fibres de polymère (PEHD) :

Les fibres de polymère que nous avons utilisé, ce sont des déchets des tuyaux de polyéthylène haute densité (PEHD) qui sont utilisés pour la distribution d'eau potable. Nous avons transformé ces déchets sous forme de fibres de dimensions de (10 mm et 15 mm) que l'on peut utiliser dans notre travail.



**Figure II - 15 :** déchets des tuyaux (PEHD).



**Figure II - 14:**fibres de polymère

II.3.1.2.1 . Caractéristiques :

- Densité : .....0.96 (g/cm<sup>3</sup>)
- Diamètre (mm) : .....1
- Résistance à la traction 22 °C : .....31,72 MPa
- Module de traction : .....1 379 MPa
- Résistance en flexion : .....31,72 MPa
- Résistance à la compression : .....31,72 MPa

II.3.1.2.2 Propriétés :

- Bonnes résistances chimiques
- Bonnes résistances aux chocs
- Résistances à l'abrasion

II.3.2 Préparation de résine :

On a fabriqué des éprouvettes en résine époxy renforcée et non renforcée avec des dimensions selon la norme ISO 527 B.

II.3.2.1 Résine époxy :

La résine époxy utilisée **MEDAPOXY INJECT 812** est un produit d'injection à base de liant résineux réactif, il est fourni sous forme de 2 composants :

Élément A : Résine

Élément B : Durcisseur

Conforme à la norme EN 1504-5



Figure II - 16: Résine époxy et son durcisseur.

## II.3.2.1.1 Caractéristiques :

- Rapport pondéral (A / B) : .....2/1
- Densité : ..... 1,1 ± 0,1
- Durcissement complet .....07 j à 20°C
- Viscosité : .....17 sec (±2)

## II.3.2.1.2 Propriétés :

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

## II.3.2.2 Élaboration des éprouvettes de résine époxy avec des fibres

la phase suivante consiste à élaborer les éprouvettes en résine, selon un procédé adapté au type de matériau souhaité (renforcé ou non renforcé).

## II.3.2.2.1 Caractéristiques du moule :

Les éprouvettes de la résine et résine renforcée ont été élaborées à l'aide d'un moule métallique, suivant la norme ISO 527-2.

Les dimensions des éprouvettes sont indiquées dans la figure II.17.

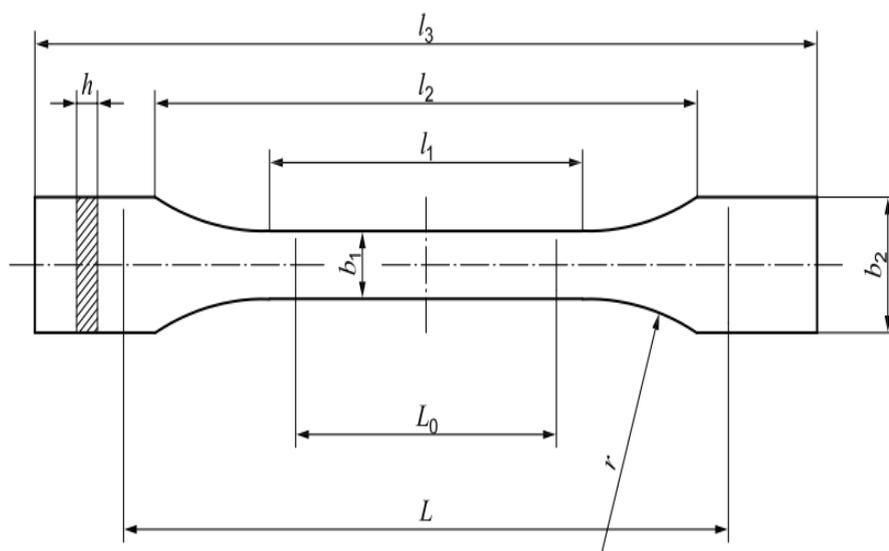


Figure II - 17: Dimensions de l'éprouvette de traction suivant la norme 527 – 2

**Tableau II - 20:**  
*Dimensions de l'éprouvette de traction suivant la norme 527 – 2.*

Symboles	Les différentes dimensions	Les valeurs en « mm »
<b>L3</b>	Longueur totale	170
<b>L1</b>	Longueur de la partie étroite parallèle	$80 \pm 2$
<b>R</b>	Rayon	20-25
<b>b2</b>	Largeur aux extrémités	$20 \pm 0,2$
<b>b1</b>	Largeur de la partie étroite	$10 \pm 0,2$
<b>H</b>	Epaisseur	$4 \pm 0,2$
<b>L0</b>	Longueur de référence	$50 \pm 0,5$
<b>L</b>	Distance initiale entre mors	$115 \pm 1$



**Figure II - 18:** Moule métallique suivant la norme ISO 527-2

## II.3.2.2.2 Mode opératoire :

On prépare le moule par un nettoyage des parois. Après, on met de la vaseline, car il n'y a pas d'agent démoulant pour faciliter le démoulage. Ensuite, on prépare notre mélange (résine + durcisseur) qui contient 2/3 de résine et 1/3 de durcisseur, ça pour des éprouvettes de résine témoin. Et pour la résine renforcée, on ajoute au mélange trois dimensions des fibres (0,5, 1 et 1,5 cm) avec plusieurs pourcentages (0,5, 1, 1,5 et 2 %) pour chaque dimension. Ensuite, on verse le mélange dans le moule. Une fois le mélange homogène obtenu, il est coulé dans les moules. Les éprouvettes sont ensuite laissées au repos pendant 24 heures à température ambiante pour permettre la première phase de durcissement. Après démoulage, elles sont placées dans une étuve d'au moins 8 heures, afin d'assurer un durcissement complet et optimal des matériaux.



**Figure II - 19:** *éprouvettes de résine témoin.*



**Figure II - 20:** *éprouvettes de résine renforcée en fibres de verre.*



**Figure II - 21:** éprouvettes de résine renforcée en fibre de polymère

### II.3.2.3 Différentes variantes :

Nomenclature	Type de fibres	Dimension (cm)	Pourcentage (%)
EP	////	////	////
EP-P1-1	Fibres de polymère	1	1
EP-P1-2	Fibres de polymère	1	2
EP-P1-3	Fibres de polymère	1	3
EP-P1.5-1	Fibres de polymère	1.5	1
EP-P1.5-2	Fibres de polymère	1.5	2
EP-P1.5-3	Fibres de polymère	1.5	3
EP-V1-1	Fibres de verre	1	1
EP-V1-3	Fibres de verre	1	3
EP-V1.5-1	Fibres de verre	1.5	1
EP-V1.5-3	Fibres de verre	1.5	3
EP-PV1.5-1	Fibres de polymère+ verre	1.5	0.5 % de verre 0.5 % de polymère
EP-PV1.5-1.5	Fibres de polymère+ verre	1.5	0.75 % de verre 0.75 % de polymère
EP-PV1.5-2	Fibres de polymère+ verre	1.5	1 % de verre 1 % de polymère

Avec :

EP : éprouvette en résine époxy

P : Fibres de polymère

V : Fibres de verre

**Exemple:**

EP-P1.5-3 : éprouvette de résine époxy avec fibre de polymère de dimension 1.5 cm et pourcentage de 3 %.

II.4 Technique de caractérisation :

Dans cette partie, on présente les différentes techniques de caractérisation de béton et de résine renforcée et non renforcée.

II.4.1 Propriété mécanique de béton

II.4.1.1 Essai de la résistance à la compression (NF EN 196-1)

L'essai de la compression s'effectue sur des différents types des éprouvette, telle que cylindrique 16\*32cm et aussi cubique de 15x15x15cm, à l'aide d'une machine de compression pour déterminer la résistance à la compression a 28 j.

**Tableau II - 21:** résultats de l'essai de compression d'éprouvettes cylindrique 16\*32.

	Masse (KG)	Charge (KN)	Résistance a la compression (MPA)
Éprouvette 01	15.312	843.4	41.9
Éprouvette 02	15.348	935.5	46.5
Éprouvette 03	15.322	799.2	39.7
Moyenne	/	/	42.7



**Figure II - 22:** machine de compression

### II.4.1.2 Essai de la résistance à la traction par flexion : (NF P 15-471)

C'est un essai de flexion trois points effectué sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (7x7x28) cm<sup>3</sup> mûries à l'eau. À l'aide d'une machine de traction.



**Figure II - 23: machine de traction par flexion.**

**Tableau II - 22: résultats de l'essai de traction d'éprouvettes prismatique 7\*7\*28.**

	Masse (KG)	Charge (KN)	Résistance a la traction (MPA)
<b>Eprouvette 01</b>	3.3685	7.6	6.3
<b>Eprouvette 02</b>	3.418	7.4	6.1
<b>Eprouvette 03</b>	3395.5	6.8	5.6
<b>Moyenne</b>	/	/	<b>6</b>

## II.4.2 Propriétés mécaniques de résine renforcée non renforcée

### II.4.2.1 Essai de traction

L'essai de traction constitue l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour l'évaluation des propriétés mécaniques de la résine. Il permet d'obtenir plusieurs paramètres normalisés essentiels aux calculs de dimensionnement, tels que la contrainte à la rupture, la contrainte maximale, la limite d'élasticité, etc. Cet essai a été réalisé au sein du laboratoire de recherche

de l'Université de Boumerdès à l'aide d'une machine de traction Zwick/Roell, avec une vitesse d'application de 2 mm/min.



**Figure II - 24:** machine de traction Zwick/Roell.

#### II.4.3 Propriété mécanique des éléments de structure (éprouvette de béton + plaque en résine) :

Dans la suite de notre démarche expérimentale, les éprouvettes en béton ont été renforcées à l'aide des plaques en résine que nous avons préalablement préparées. Ces échantillons ont ensuite été soumis à des essais mécaniques, notamment un essai de compression et un essai de traction par flexion, afin d'évaluer l'influence du renforcement sur les performances mécaniques du béton.

#### II.5 Conclusion partielle :

Dans ce chapitre, nous avons exposé de manière détaillée l'ensemble des étapes de l'étude expérimentale menée dans le cadre de ce travail. L'analyse a débuté par la caractérisation des constituants du béton, suivie de sa formulation selon la méthode de DREUX-GORISSE, puis de la fabrication des éprouvettes en béton. Par la suite, des éprouvettes en résine non renforcée (témoin) et en résine renforcée ont été préparées, en parallèle à l'élaboration de plaques de renforcement à base de fibres hybrides. Enfin, les différentes techniques de caractérisation appliquées aussi bien aux éprouvettes en béton qu'à celles en résine ont été présentées.

***CHAPITRE III :***  
***RESULTATS***  
***EXPERIMENTAUX***  
***ET***  
***DISSCUSSION***

### III.1 Introduction :

Le présent chapitre récapitule les résultats expérimentaux des différentes variantes des éprouvettes en résine époxy renforcées par différents types de fibres (polymère, verre et hybride), ainsi que les essais sur les plaques en résine collées sur des éprouvettes en béton.

### III.2 Essai de traction des éprouvettes de résine renforcée et non renforcée :

Les résultats des essais de traction sur les éprouvettes en résine époxy non renforcée et renforcée :

**Tableau III - 1: Résultats de l'essai de traction des différentes variantes**

Éprouvette	La contrainte (Mpa)	Déformation (%)	Module d'élasticité (E) (Mpa)
EP	26.4	3.09	1294.29
EP-P1-1	28.44	1.99	2024.35
EP-P1-3	26.84	1.96	1873.24
EP-P1-5	24.5	2.02	1687.6
EP-P1.5-1	39.92	2.53	2210.42
EP-P1.5-3	40.86	2.91	2102.69
EP-P1.5-5	36.26	2.74	1878.04
EP-V1-1	36.02	2.06	2193.79
EP-V1-3	38.79	2.25	2281.17
EP-V1.5-1	47.42	3.61	2021.31
EP-V1.5-3	60.50	3.38	2438.80
EP-PV1.5-1	37.09	2.38	2100
EP-PV1.5-1.5	38.19	2.31	2306.27
EP-PV1.5-2	39.50	2.36	2218.57

#### III.2.1 Courbes contrainte-déformations :

La courbe contrainte-déformation des éprouvettes en résine époxy non renforcée soumises à la traction est représentée sur la figure III.1.

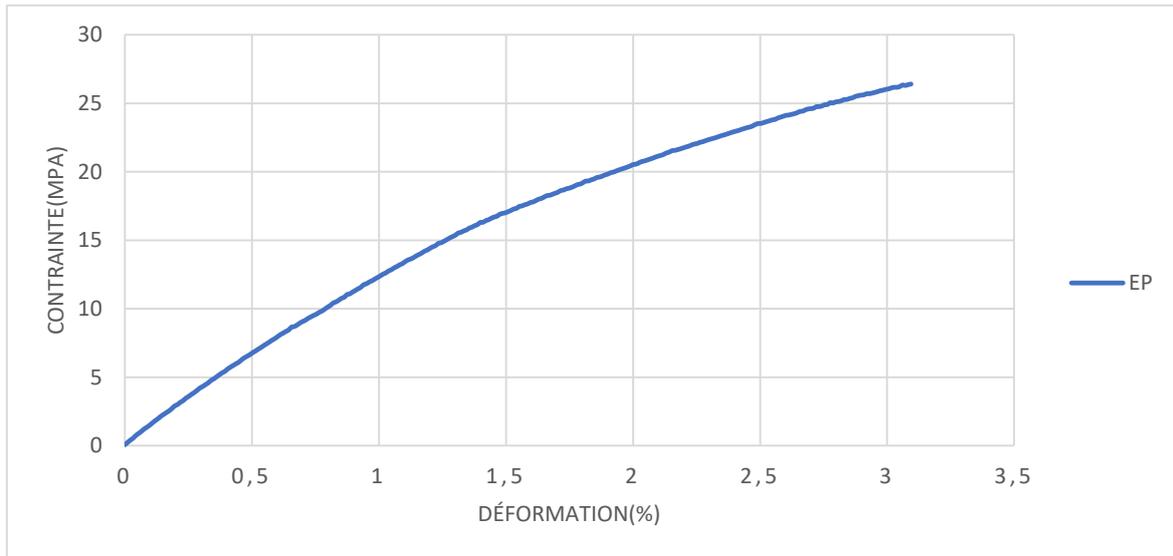


Figure III - 1: courbe contrainte-déformation d'éprouvette de résine époxy non renforcée.

Les figures III.2 et III.3 regroupent les courbes contrainte-déformation des éprouvettes en résine époxy non renforcée et renforcée par des fibres de polymère de dimension 1 cm et 1,5 cm respectivement.

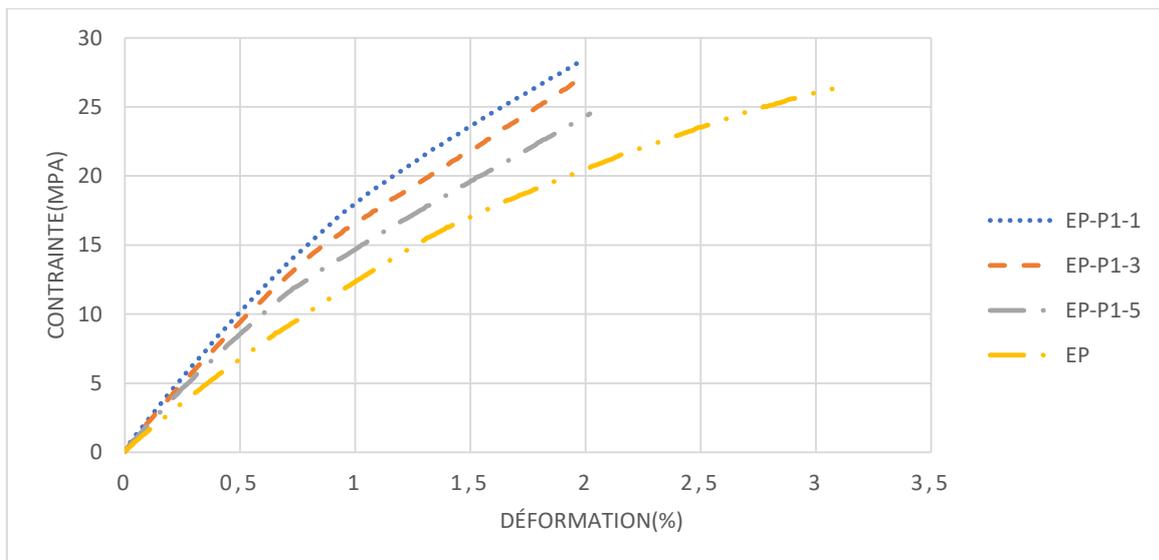
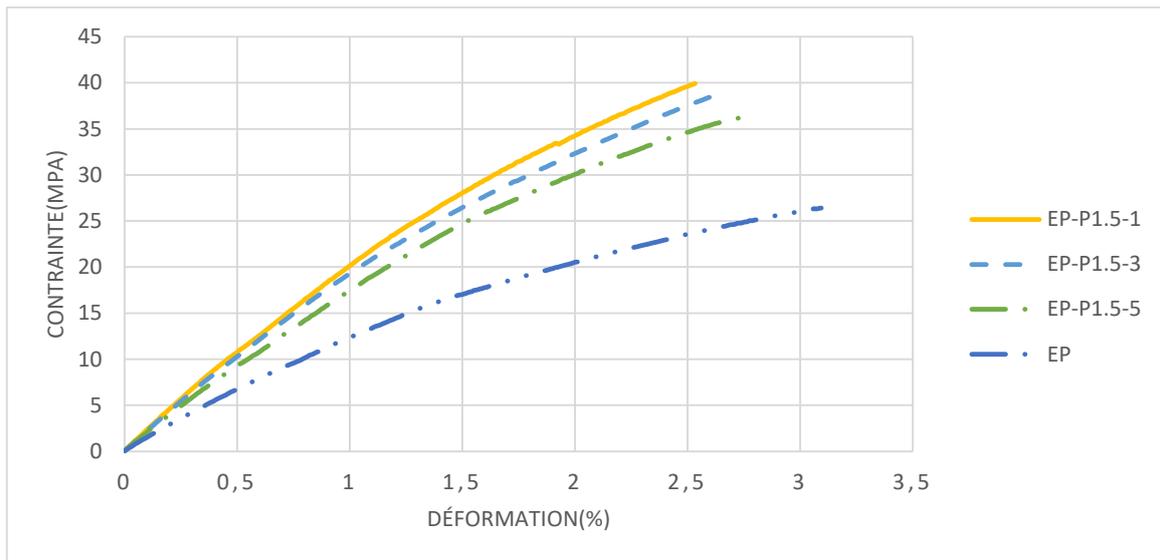


Figure III - 2: courbes contrainte-déformation des éprouvettes de résine époxy renforcée avec fibre polymère de 1 cm.

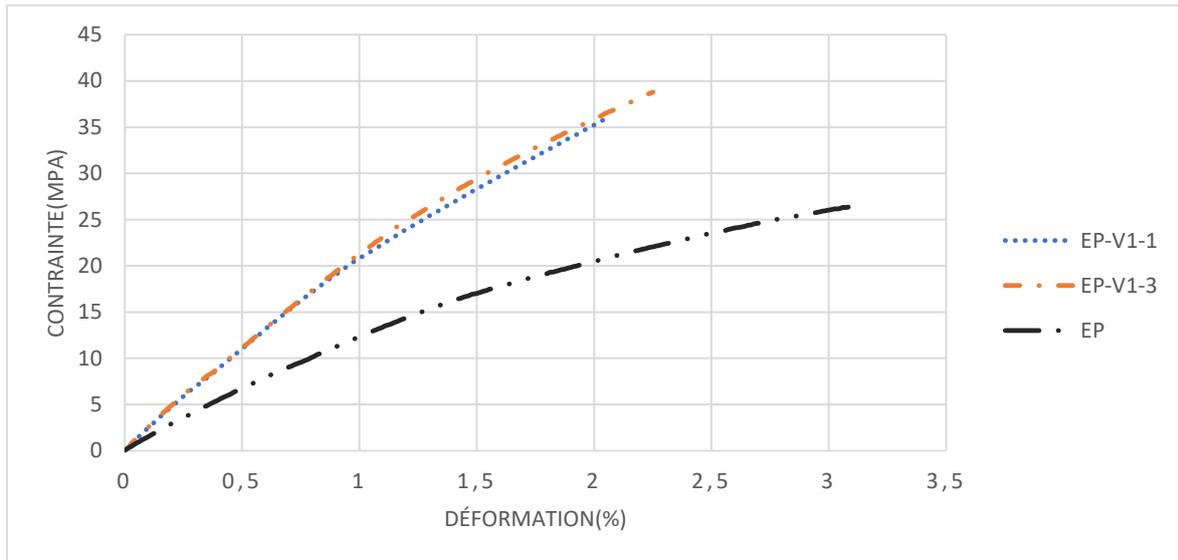


**Figure III - 3:** courbes contrainte-déformation des éprouvettes de résine époxy renforcée avec fibre polymère de 1.5 cm.

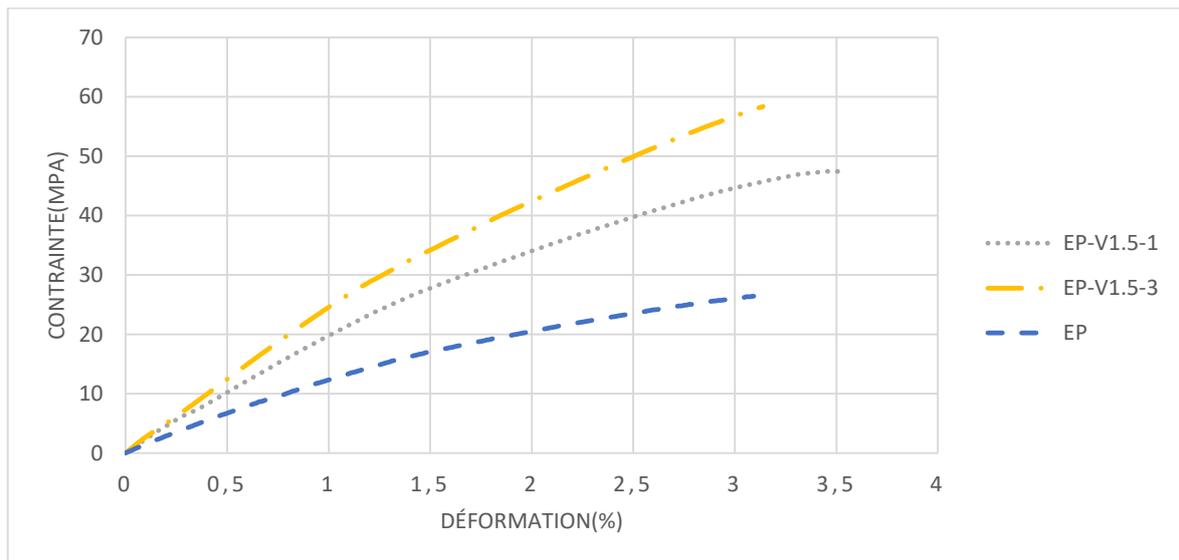
D'après les figures de contrainte-déformation, il est évident, que les courbes pour les différentes variantes gardent la même allure ascendante jusqu'à la rupture. Cependant, la phase élastique est très restreinte, sous une faible charge, le comportement passe directement à la phase élastoplastique

La présence de fibres de polymère permet l'amélioration du comportement globale de l'éprouvette en résine époxy et sa résistance à la traction, tandis que l'éprouvette témoin (en résine époxy non renforcée) présente une résistance à la traction de 26.4 MPa avec une déformation de 3.09 % et un module d'élasticité de 1294.29 MPa. Néanmoins, les éprouvettes renforcées, présente une amélioration des performances mécaniques qui peut atteindre 40,86 MPa de résistance à la traction avec une module d'élasticité  $E = 2210,42 \text{ MPa}$  dans le cas des fibres polymère de 1,5 cm de dimension.

Le comportement global des éprouvettes en résine époxy renforcées par des fibres de verre (figures III.4 et III.5), demeure inchangé par rapport aux observations précédentes, avec plus d'amélioration dans les performances mécaniques. Sauf que, l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation reste très proche dans le cas de renforcement avec des fibres de verre de 1 cm, malgré la variation de pourcentage des fibres de 1% et à 3% (voir la figure III.4). Contrairement au renforcement par fibres de 1,5 cm, qui présente un écartement entre les deux courbes de 1% et à 3% de fibres de verre (voir la figure III.5).

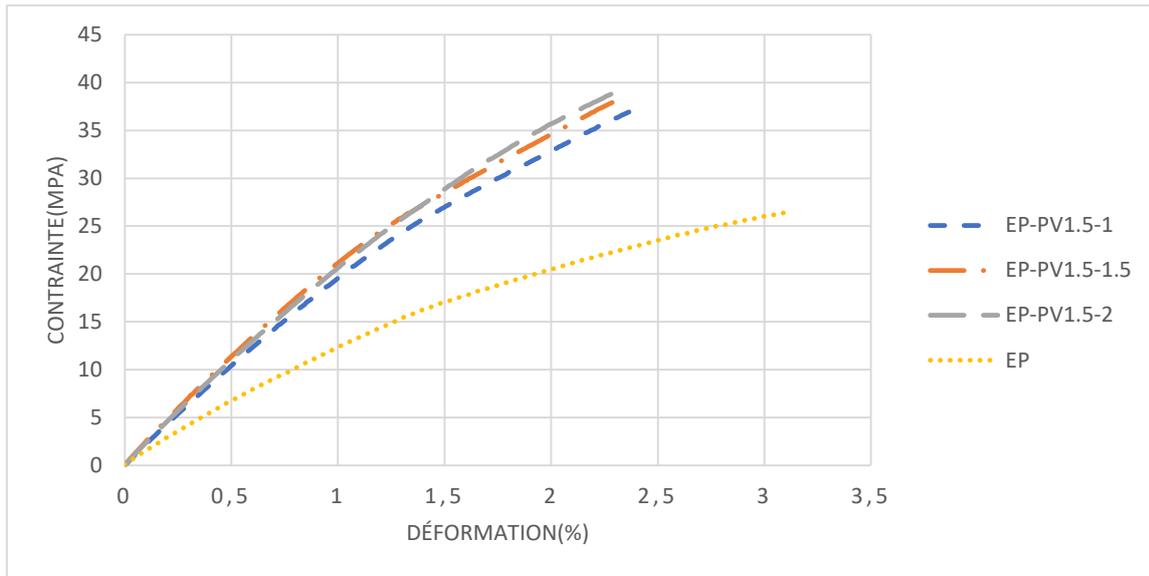


**Figure III - 4:** Courbes contrainte-déformation des éprouvettes de résine époxy renforcée avec fibre verre de L=1 cm.

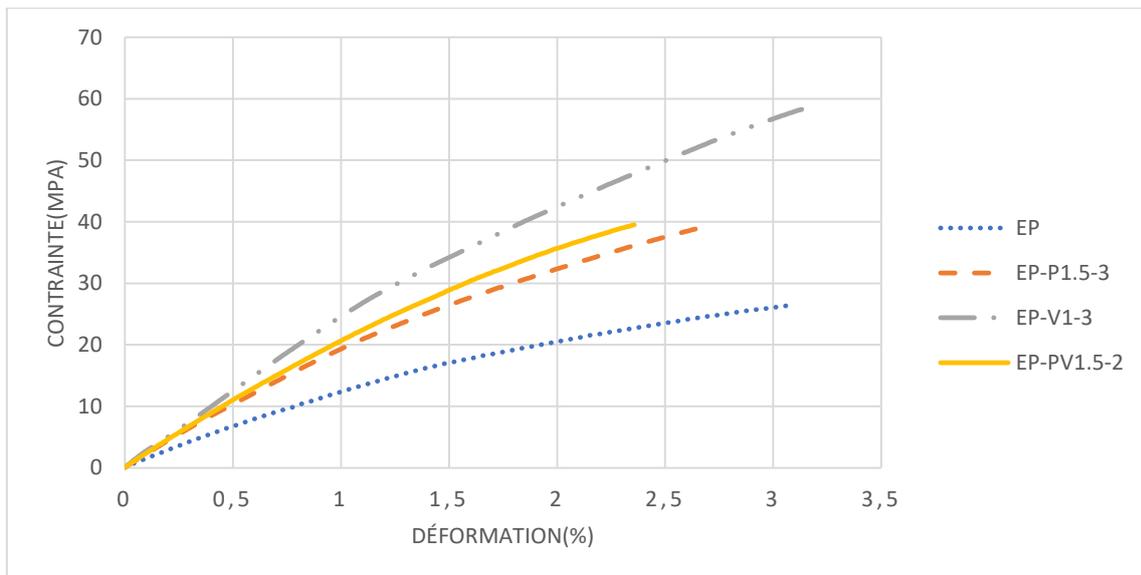


**Figure III - 5:** Courbes contrainte-déformation des éprouvettes de résine époxy renforcée avec fibres verre de L=1.5 cm.

Dans le cas de renforcement avec des fibres hybrides (voir la figure III.6), les observations antérieures concernant le comportement global des éprouvettes en résine de verre sont maintenues, avec des courbes proches malgré en changeant le pourcentage des fibres hybrides.



**Figure III - 6:** Courbe contrainte-déformation des éprouvettes de résine époxy renforcée avec fibres hybrides.



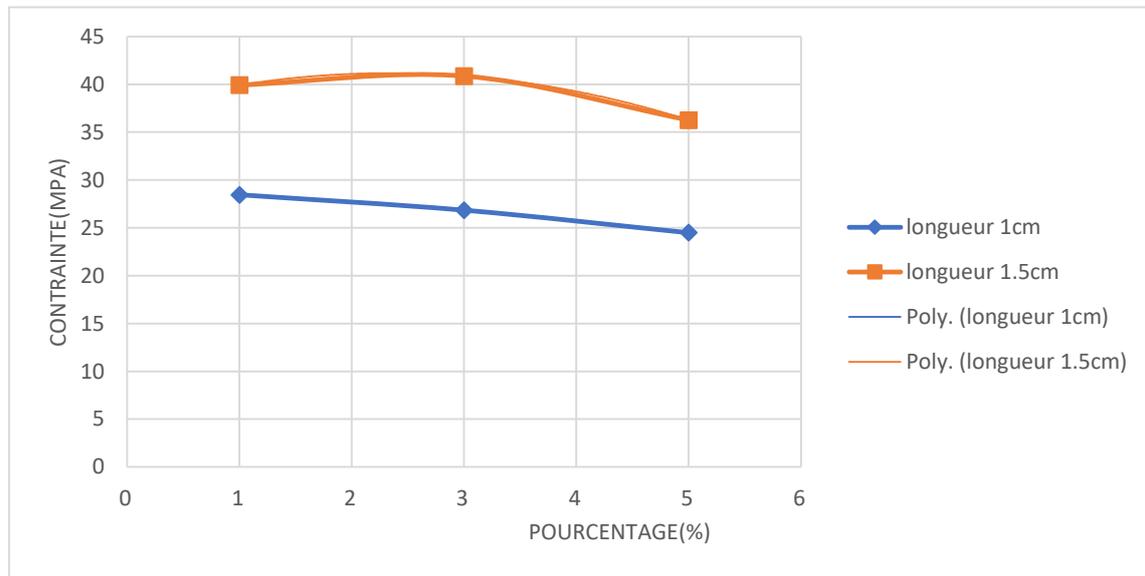
**Figure III - 7:** Confrontation des courbes contrainte-déformation (EP / EP-P / EP-V / EP-PV).

Dans la figure III.7, on a représenté les meilleurs résultats des différentes variantes. on a constaté la performance de l'addition des fibres à la résine, est liée au type de fibre, en particulier la fibre de verre qui reste le plus remarquable. Cela prouve ensuite que le renforcement de la résine époxy permet d'atteindre de meilleures résistances en supportant les charges plus importantes.

### III.2.2 Effet du pourcentage de fibres sur la résistance à la traction

Dans ce paragraphe, nous avons examiné l'influence de pourcentage des différents types de fibres renforçant la résine époxy sur la résistance à la traction.

#### III.2.2.1 Renforcement par des fibres de polymères



**Figure III - 8:**  
*effet de pourcentage de fibres de polymère sur la résistance à la traction.*

La résistance à la traction est fortement influencée par le taux d'incorporation des fibres, jusqu'à l'atteinte d'un pourcentage optimal. Les performances maximales obtenues (en termes de résistance et de dosage en fibres) varient selon la longueur des fibres polymériques utilisées. Pour les fibres de 1,5 cm, on observe une augmentation progressive de la contrainte avec l'élévation du pourcentage de fibres, atteignant un pic à 3 %, ce qui traduit un effet de renforcement plus marqué à cette concentration. Au-delà de 3 %, la contrainte diminue, ce qui peut être dû à une mauvaise dispersion ou à une saturation de la matrice, réduisant l'efficacité du renfort. Concernant, la dimension de 1 cm de fibre, le pourcentage optimum demeure inférieur à 3% tandis que la courbe reste descendante, contrairement au précédente.

Le tableau III.2 présente les valeurs d'augmentation de la résistance à la traction des éprouvettes en résine renforcée par des différents pourcentages de fibres de polymère de dimensions (1 cm et 1.5 cm) par rapport à la résine non renforcée ( $R_t = 26,40 \text{ MPa}$ ).

La présence de fibres est clairement apparue dès le premier pourcentage quelle que soit sa dimension. En revanche, la résistance commence à chuter si cela dépasse un certain pourcentage (pourcentage optimum de la fibre 1,5 cm égale à 2.33 % et celui de dimension 1 cm égale à 2.32%) [voir les équation III. 4 et III. 8], et ce qui est confirmé par 5%, notamment en ce qui concerne la dimension (1 cm) qui devient inférieure au témoin de (7,19%).

**Tableau III - 2:** Valeurs d'augmentation de la résistance à la traction – résine renforcée par des fibres de polymère.

<b>Dimension</b> <b>Pourcentage</b>	<b>1 cm</b>	<b>1.5 cm</b>
<b>1 %</b>	7.72 %	51.21 %
<b>3 %</b>	1.66 %	54.77 %
<b>5 %</b>	-7.19 %	37.34 %

#### Calcul du pourcentage optimum (%):

Le calcul de pourcentage optimum est effectué à travers la première dérivée de la fonction de la courbe de tendance.

*Cette dernière est de type polynomiale de coefficient de corrélation  $R^2 = 1$ .*

L'équation III.1 est celle de la courbe des fibres de polymère de longueur est égale à 1,5 cm (figure 3.8). L'équation III.2 est la dérivée de l'équation III.1.

$$y = -0.6925x^2 + 3.24x + 37.373 \quad (\text{III.1})$$

$$y' = -1.385x + 3.24 \quad (\text{III.2})$$

$$y'=0 \rightarrow -1.385x + 3.24 = 0 \quad (\text{III.3})$$

$$x = 2.33 \% \quad (\text{III.4})$$

Alors le pourcentage optimum de la fibre de polymère de 1,5 cm de longueur est égal à 2.33%.

L'équation III.5 est celle de la courbe du composite avec des fibres de polymère de longueur est égale à 1cm (figure III.8). L'équation III.2 est la dérivée de l'équation III.1.

$$y = -0.0925x^2 - 0.43x + 28.963 \quad (\text{III.5})$$

$$y' = -0.185x - 0.43 \quad (\text{III.6})$$

$$y'=0 \rightarrow -0.185x - 0.43=0 \tag{III.7}$$

$$X = 2.32 \% \tag{III.8}$$

Donc le pourcentage optimum des fibres de polymère de 1 cm de longueur est égal à 2.32%.

III.2.2.2 Renforcement par des Fibres de verre :

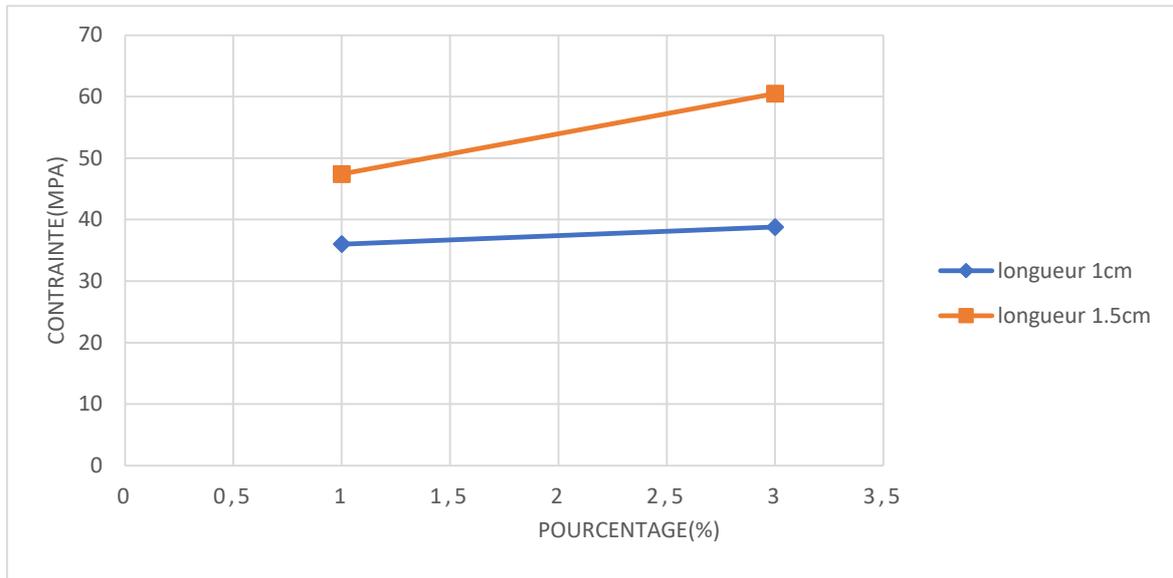


Figure III - 9: effet de pourcentage de fibres de verre sur la résistance.

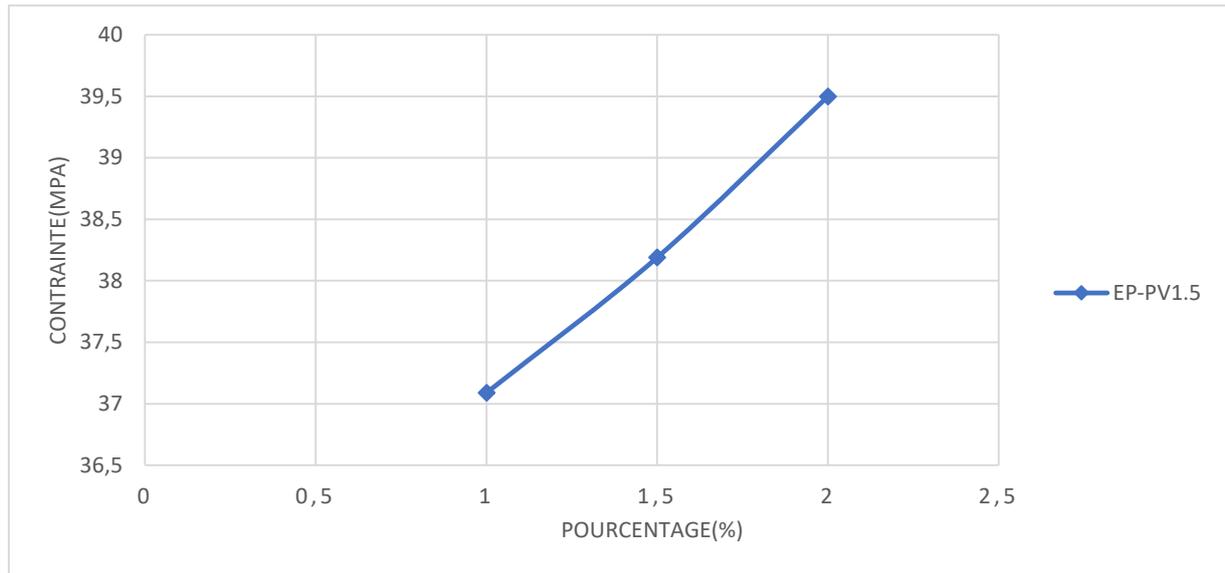
L’ajout de fibres de verre à la résine époxy améliore nettement sa résistance à la traction, comme l’illustre la figure III.9. Cette amélioration est d’autant plus significative avec des fibres de 1,5 cm, atteignant une résistance de 60,5 MPa à un taux de 3 %, contre 39 MPa pour des fibres de 1 cm à la même proportion. Ces résultats montrent qu’une longueur adéquate et un dosage modéré des fibres favorisent un renforcement efficace. Le tableau III.3 présente les gains de résistance pour différents longueurs (1 cm et 1,5 cm) et taux d’incorporation (1 % et 3 %), en comparaison avec l’éprouvette non renforcée (Rt = 26,40 MPa).

Tableau III - 3: Valeurs d’augmentation de la résistance à la traction – résine renforcée par fibres de verre.

Dimension \ Pourcentage	1 cm	1.5 cm
1 %	36.43 %	79.62 %
3 %	46.93 %	129.16 %

Dès l'ajout de faible pourcentage, la présence des fibres est évidente, quelle que soit sa dimension. En plus, l'utilisation des fibres de longueur  $1,5\text{ cm}$  et de pourcentage de dosage de  $3\%$  a abouti à de très bon résultats,  $129,16\%$  d'augmentation de la résistance à la traction par rapport à la résine non renforcée.

### III.2.2.3 Renforcement par des fibres hybrides :



**Figure III - 10: effet du pourcentage des fibres hybrides sur la résistance.**

Le renforcement de la résine époxy par des fibres hybrides permet de formuler les mêmes conclusions précédentes. En revanche, le pourcentage d'augmentation maximale de la résistance à la traction par rapport l'éprouvette témoin (voir le tableau III.4) qui est égale à de  $49.62\%$ , reste plus faible par rapport à celui obtenu avec de plus faibles renforcements soit par la fibre de polymère ou par la fibre de verre. Ceci nécessite d'autres études expérimentales pour trouver la meilleure fraction de fibres à incorporer dans la matrice résineuse.

**Tableau III - 4: Valeurs d'augmentation de la résistance à la traction – résine renforcée par fibres hybrides**

Dimension Pourcentage	1.5 cm
1 %	40.49

1.5 %	44.65
2 %	49.62%

III.2.3 Effet de dimension de fibres sur la résistance à la traction :

Ce paragraphe aborde l'impact des dimensions des différents types de fibres renforçant la résine époxy sur la résistance à la traction. Dans les figures ci-dessous, nous avons considéré les valeurs maximales des résistances pour chaque type de renforcement en fonction de la dimension de la fibre.

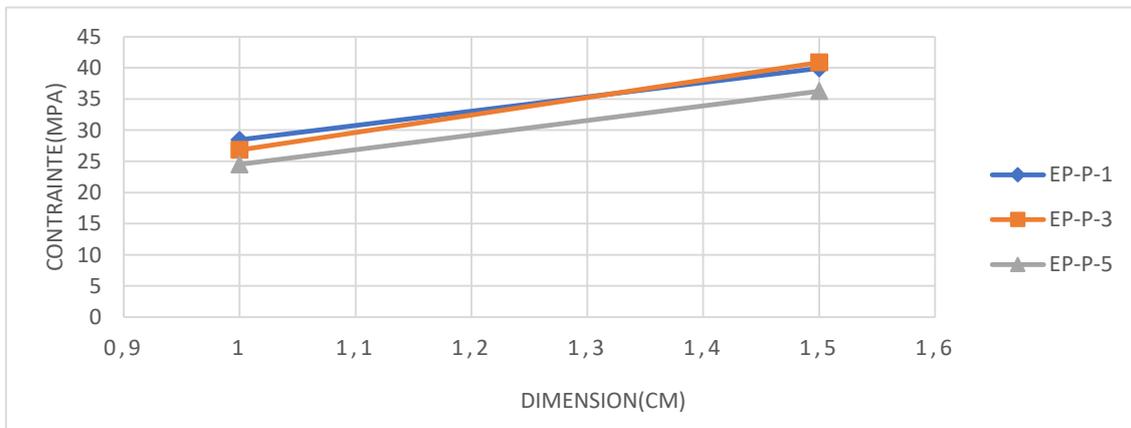


Figure III - 11: effet de dimension de fibres de polymère sur la résistance à la traction.

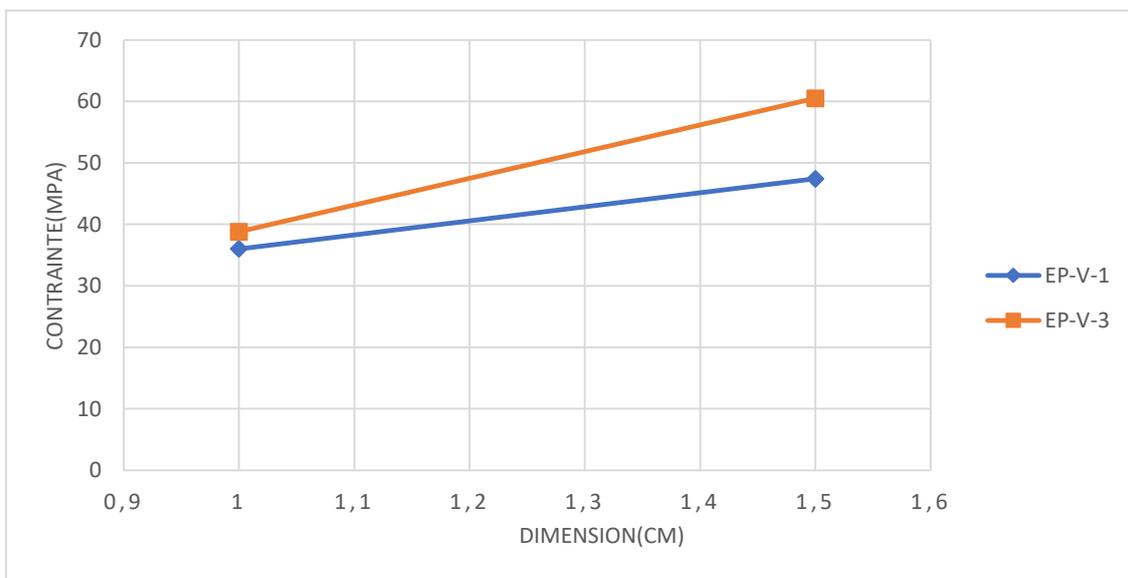


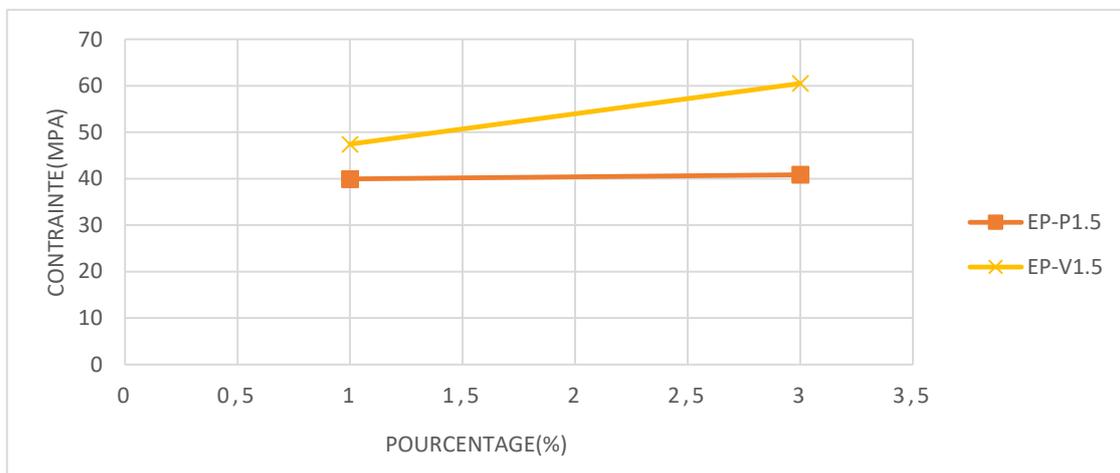
Figure III - 12: effet de dimension de fibres de verre sur la résistance

**à la traction.**

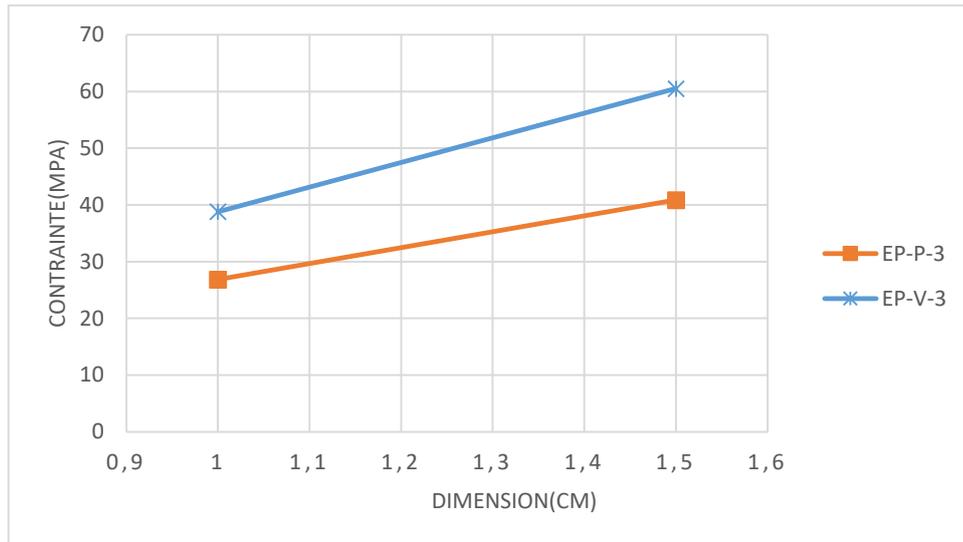
La résistance de la résine renforcée de fibres de polymère a augmenté de 52,23 %, passant de 26,842 MPa à 40,86 MPa. Concernant le renforcement avec des fibres de verre, nous avons enregistré une amélioration de résistance de 67,41 % avec des valeurs de 36,02 MPa à 60,5 MPa.

**III.2.4 Confrontation des courbes :**

Cette partie est consacrée à la comparaison entre les meilleurs résultats des différentes variantes afin de trouver le meilleur renforcement de la résine époxy selon le type de fibre, sa dimension et le dosage. Les résultats sont illustrés sur les figures (III.13) et (III.14).



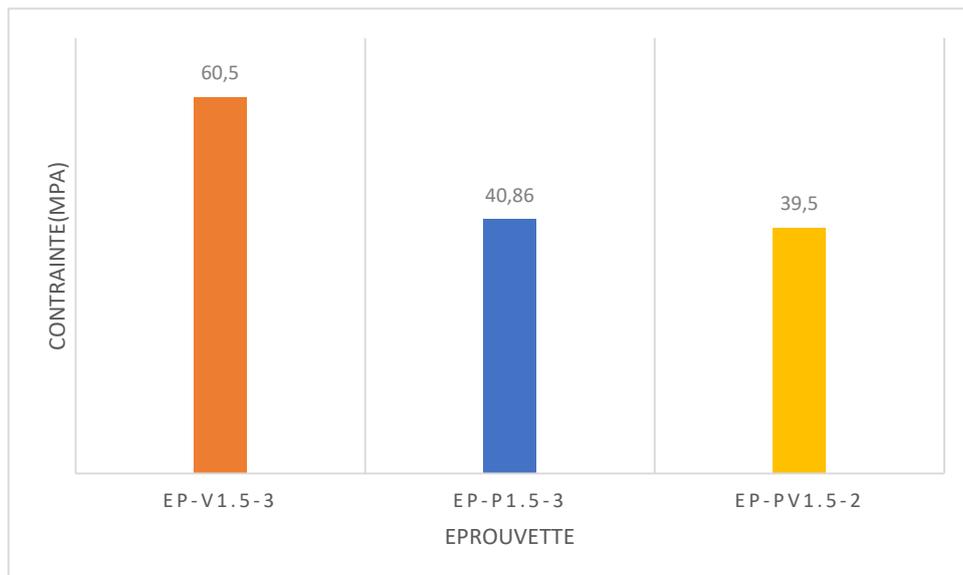
**Figure III - 13: Confrontation des courbes contrainte pourcentage de fibres des éprouvettes en résine renforcée par des fibres à 1,5 cm**



**Figure III - 14: Confrontation des courbes contrainte – pourcentage de fibres des éprouvettes en résine renforcée par des fibres à 3%.**

Les éprouvettes en résine époxy renforcées par des fibres de verre présentent une meilleure résistance à la traction de différents pourcentages et dimensions par rapport aux éprouvettes en résine époxy renforcée par des fibres de polymères.

Afin de bien montrer les meilleures résistances des différence variantes (épreuve renforcée par des fibres de polymère, éprouvette renforcée par des fibres de verres et éprouvette renforcée par des fibres hybrides), nous regroupons les valeurs maximales sur la même figure ci-dessous :



**Figure III - 15: valeurs maximales des contraintes à la traction des différentes variantes**

Les résultats obtenus montrent que le renforcement à l'aide de fibres de verre offre une résistance supérieure comparée aux autres types de renforts. En revanche, les performances des renforts en fibres hybrides et en fibres polymériques sont relativement proches. Cela suggère la nécessité d'explorer d'autres taux de fibres afin d'optimiser davantage la résistance mécanique.

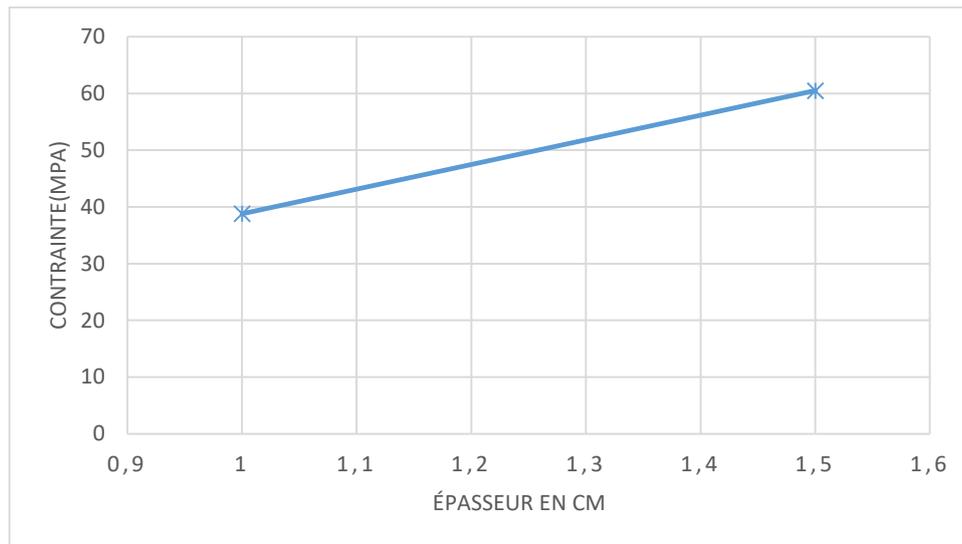
### III.3 Essai de compression des éprouvettes de résine renforcées et non renforcées :

Afin de tester la résistance de la plaque d'appui en résine renforcée par des fibres hybrides, placée sur une structure rigide en béton pour optimiser l'absorption des déformations et par conséquent un meilleur amortissement des charges compressives, un modèle expérimental a été élaboré via montage d'une éprouvette cubique surmontée par une plaque en résine renforcée par des fibres hybride soumise aux sollicitations de compression. Les dimensions de l'éprouvettes en béton sont 7x7x7 en cm. Par contre, nous avons varié l'épaisseur de la plaque de résine renforcée avec 4 cm et 6 cm d'épaisseur, en fixant les autres dimensions 7x7 en cm.

Les résultats sont affichés sur le tableau III.5 :

**Tableau III - 5:** résultats d'écrasement

N° d'éprouvettes	Epaisseur de la plaque en résine en (cm)	Force de rupture en (KN)	Résistance à la compression en (MPa)
Eprouvette 01	00	159.3	32.5
Eprouvette 02	04	/	/
Eprouvette 03	06	/	/



**Figure III - 16: Variation de la contrainte en compression en fonction de l'épaisseur de la plaque.**

#### III.4 Conclusion partielle

Les essais de traction ont révélé que l'ajout de fibres, en particulier de verre, améliore significativement les performances mécaniques de la résine époxy. La résistance à la traction ainsi que le module d'élasticité augmentent en fonction de la longueur des fibres et de leur taux d'incorporation, jusqu'à un seuil optimal. Les courbes contrainte-déformation confirment l'efficacité des fibres de 1.5 cm à 3 %, qui offrent le meilleur compromis entre rigidité et capacité de déformation.

# ***CHAPITRE IV :***

# ***SIMULATION***

#### IV.1 Introduction :

L'utilisation de la modélisation par éléments finis facilite, dans un cadre théorique, l'exécution de simulations numériques des structures en béton soutenues par des plaques composites d'appui, sous une charge uniforme de compression. Le but principal est de souligner l'impact de l'épaisseur d'une plaque composite de forme cubique face à une charge de compression.

On présente et examine tous les résultats concernant les contraintes, déformations et modes de rupture à l'aide de diagrammes et cartographies qui montrent la progression des contraintes et dommages pour une meilleure compréhension du comportement de ces structures.

#### IV.2 Présentation succincte du logiciel Abaqus :

ABAQUS est un programme de simulation par éléments finis destiné à traiter une grande diversité de problèmes mécaniques. On le connaît bien et il est largement utilisé, notamment pour sa capacité à traiter efficacement des problèmes non linéaires. Il a été élaboré par Hibbit, Karlson & Sorensen (HKS) [25].

Depuis trois décennies, ABAQUS a été continuellement perfectionné pour inclure les innovations et ainsi répondre aux exigences. En octobre 2005, Dassault industries a acquis l'entreprise, critiquant par la même occasion le logiciel « SIMULIA » [26].

L'élaboration intégrale d'une structure ou d'un élément de structure se réalise suite à un passage consécutif à travers les neuf modules de ABAQUS qui comprennent : le module part, sketch, property, assembly, step, interaction, load, mesh, job et visualisation.

ABAQUS ne prend pas en charge les unités, il appartient donc à l'utilisateur de respecter un système d'unités cohérent.

#### IV.3 Maillage et MEF

Pour parvenir à des résultats numériques cohérents, l'étape cruciale consiste à utiliser un maillage plus fin uniquement dans les zones susceptibles d'engendrer des phénomènes significatifs, tandis que le reste de la structure sera maillé de façon plus grossière. Les résultats numériques sont affectés par l'emploi d'éléments de taille identique. Par ailleurs, il est essentiel que la densité de notre maillage soit optimale pour minimiser au maximum la taille du problème et le temps d'exécution.

Le socle en béton est maillé à l'aide d'éléments tridimensionnels qui sont des éléments tétraédriques de 20 mm de côté, comportant huit nœuds dotés chacun de trois degrés de liberté. Alors que les plaques composites en FRP sont maillées à l'aide d'éléments de surface quadrilatéraux de 3 mm de côté, disposant de quatre nœuds ayant chacun 8 degrés de liberté.

#### IV.4 Modélisation du comportement des matériaux

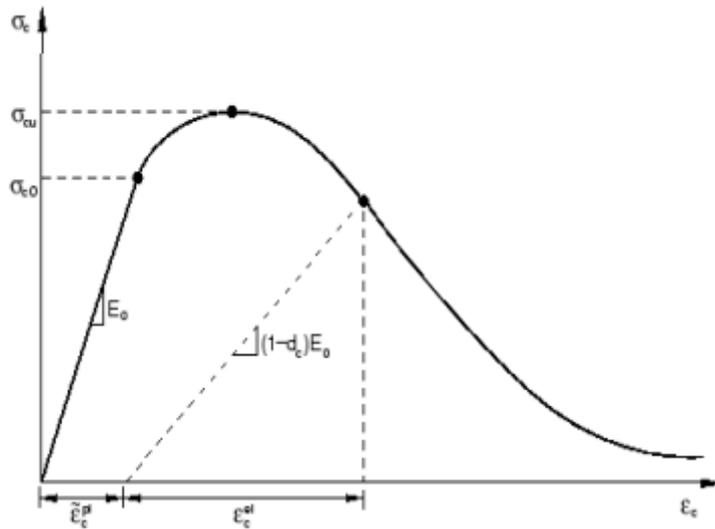
Pour obtenir la réponse globale d'une structure soumise à des sollicitations externes, le recours à un modèle numérique prédictif est indispensable. Dans ce cadre, on utilise séparément des modèles des éléments finis trouvés dans la littérature pour le béton et les matériaux composites, sous des contraintes spécifiques. Le béton est considéré comme un matériau quasi-fragile ; face à des charges modérées, il reste dans la zone élastique, ce qui implique que les déformations résultent de mouvements presque réversibles d'atomes.

Pour des sollicitations plus élevées, la défaillance survient vite, illustrant le caractère fragile de ce matériau. Le modèle « Damaged plasticity model for concrete and other quasi-brittle materials » est élaboré pour gérer les problèmes de plasticité liés à la détérioration du béton non-visqueux.

#### IV.5 Modèle non linéaire pour béton :

##### IV.5.1 Comportement en compression :

Sous un chargement de compression uni-axiale, le béton présente une caractéristique de ductilité. La courbe contrainte-déformation (Figure IV.1) est constituée de deux phases distinctes : élastique et plastique. Au cours de la première étape, la réaction est linéaire jusqu'à atteindre la valeur du seuil élastique. La seconde phase se distingue habituellement par un processus d'écrouissage suivi d'un adoucissement une fois que la contrainte de rupture est dépassée. Le béton possède des microfissures qui commencent à se développer et à se propager jusqu'à atteindre une fissuration globale du matériau (rupture).



**Figure IV- 1:**  
*Comportement du béton soumis à une compression uni axiale [27].*

Les différentes lois utilisées pour le modèle adopté pour le béton sont données par le tableau suivant.

**Tableau IV.1 :** lois utilisées pour le modèle adopté pour le béton en compression et en traction

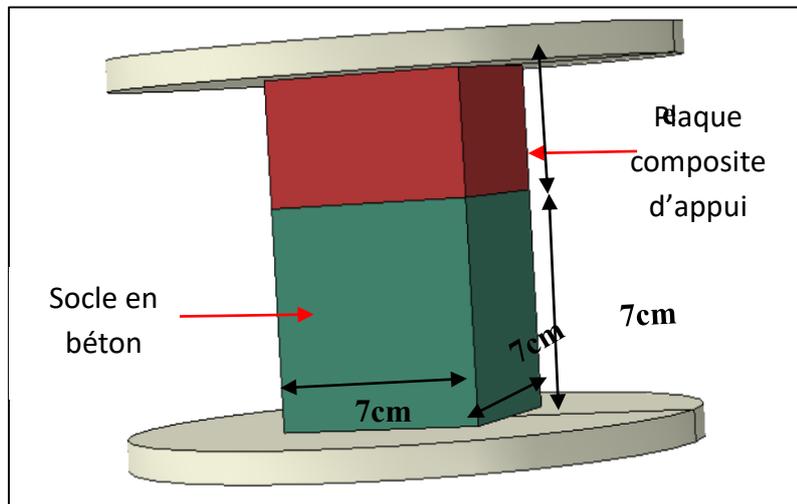
Noms	Equations
Contraintes effectives en Traction	$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{(1-d_t)} = E_0(\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl})$
Contraintes effectives en compression	$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{(1-d_c)} = E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl})$
Contrainte post élastique : Partie écrouis en compression	$\sigma_{c(2)} = \frac{E_c \frac{\varepsilon_c}{f_c} - (\varepsilon_c / \varepsilon_{c1})^2}{1 + (E_c \frac{\varepsilon_{c1}}{f_c} - 2) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} f_c$
Contrainte post élastique : Partie adoucissante en compression	$\sigma_{c(3)} = \left( \frac{2 + \gamma_c f_c \varepsilon_{c1}}{2 f_c} - \gamma_c \varepsilon_c + \frac{\gamma_c \varepsilon_c^2}{2 \varepsilon_{c1}} \right)^{-1}$
Contrainte post élastique en traction	$\frac{\sigma_t(w)}{f_t} = [1 + (c_1 w / w_c)^3] e^{-c_2 \frac{w}{w_c}} - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) e^{-c_2}$
Dommages en compression	$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} (1/b_c - 1) + \sigma_c E_c^{-1}}$
Dommages en traction	$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\varepsilon_t^{pl} (1/b_t - 1) + \sigma_t E_c^{-1}}$

#### IV.5.2 Modèle élastique orthotrope pour les FRP

Dans notre étude, nous avons utilisé des matériaux orthotropes. Les composites présentent un comportement spécifique, principalement en raison de leur caractère anisotrope. L'hypothèse des contraintes planes est illustrée en intégrant les constantes de rigidité dans les directions principales. Dans notre recherche, nous faisons appel au critère interactif de Hill-Tsai [28], étant donné que les critères basés sur la contrainte et la déformation maximales ne considèrent pas les interactions entre les contraintes principales et les déformations principales, présumant que les mécanismes de rupture élémentaires sont des phénomènes indépendants.

#### IV.6 Présentation des modèles :

Afin d'améliorer l'épaisseur de la plaque composite d'appui, placée sur une structure rigide en béton pour optimiser l'absorption des déformations et par conséquent un meilleur amortissement des charges compressives, une analyse paramétrique liée aux modifications de ces paramètres a été réalisée via une simulation numérique à l'aide du logiciel ABAQUS, On Deux épaisseurs ont été considérées :  $e_p = 4$  cm et  $e_p = 6$  cm.



**Figure IV- 2: dimensions et mode de chargement  
du socle d'appui hybride**

IV.7 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.

- Cas du socle en béton non renforcé (S-Réf)

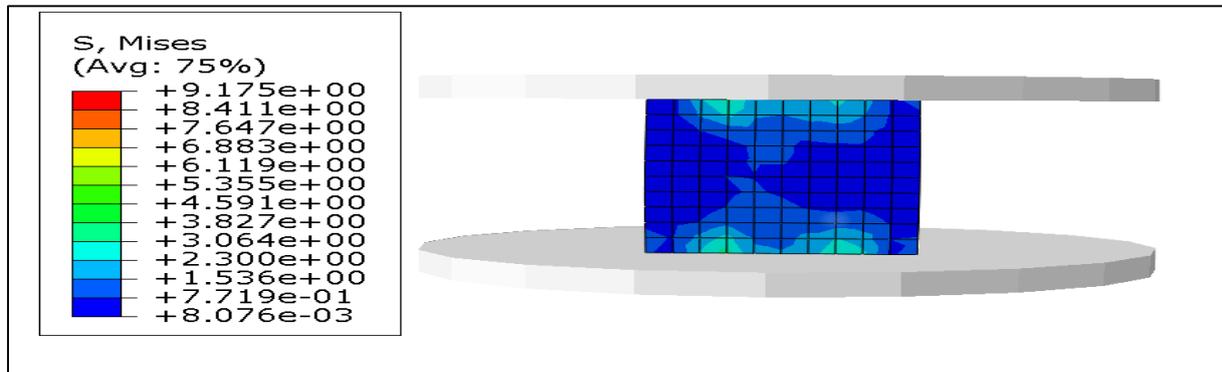


Figure IV- 3: Evolution des contraintes

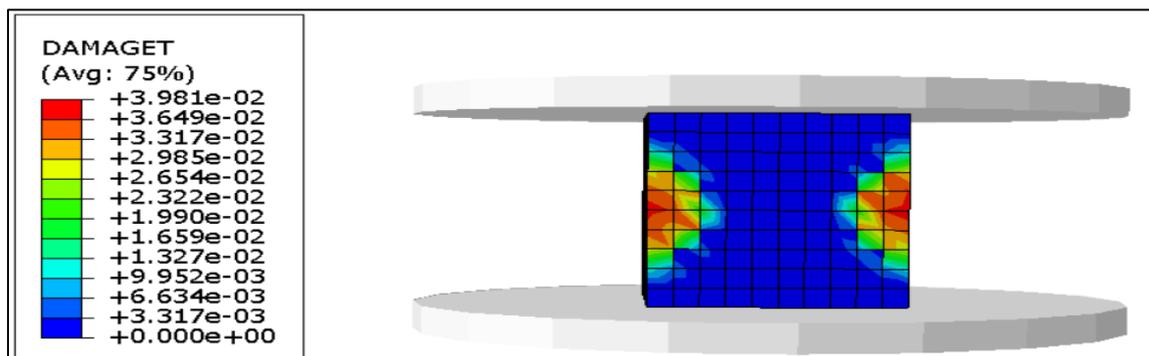


Figure IV- 4: Evolution de l'endommagement

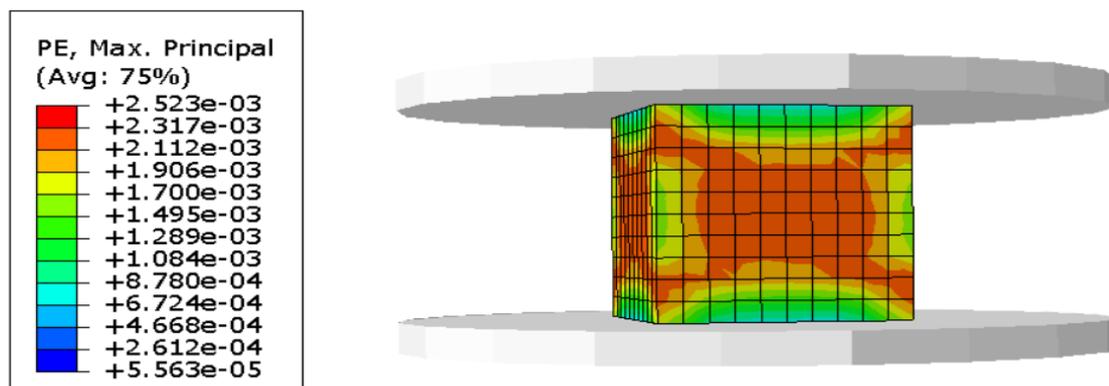


Figure IV- 5: Evolution de la fissuration

- Cas du socle en béton renforcé par plaque d'appui d'épaisseur  $e = 4$  cm (SR- 4)

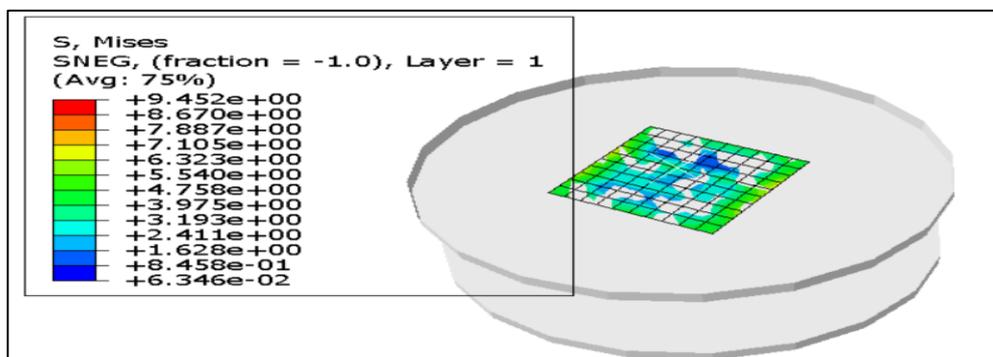
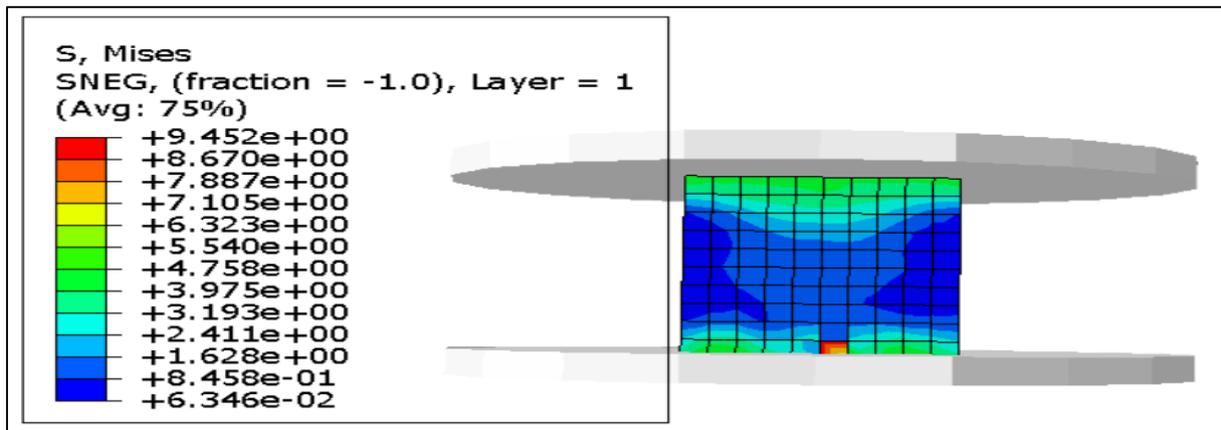


Figure IV- 6: Evolution des contraintes pour la poutre avec plaque FRP 4 cm.

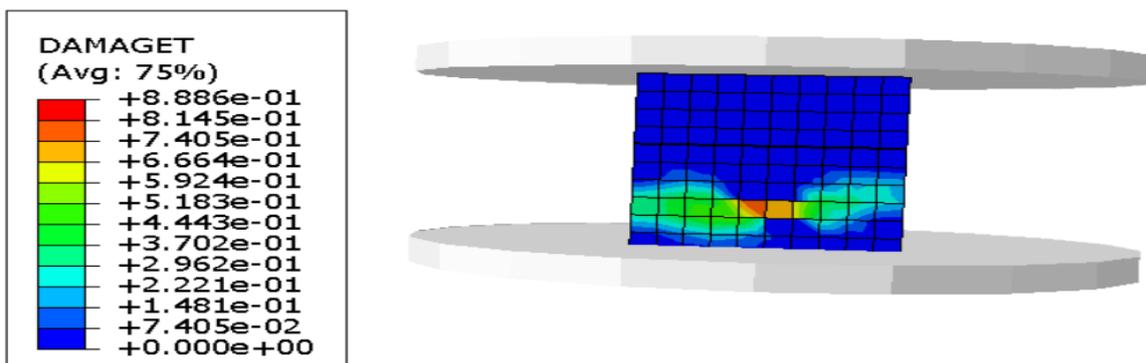


Figure IV- 7: Evolution de l'endommagement

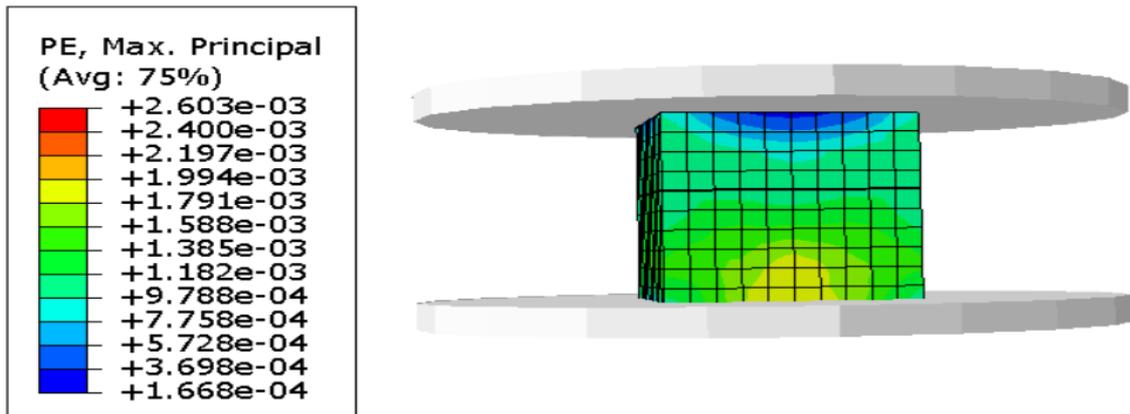


Figure IV- 8: Evolution de la fissuration.

- Cas du socle en béton renforcé par plaque d'appui d'épaisseur  $e = 6$  cm (SR- 6)

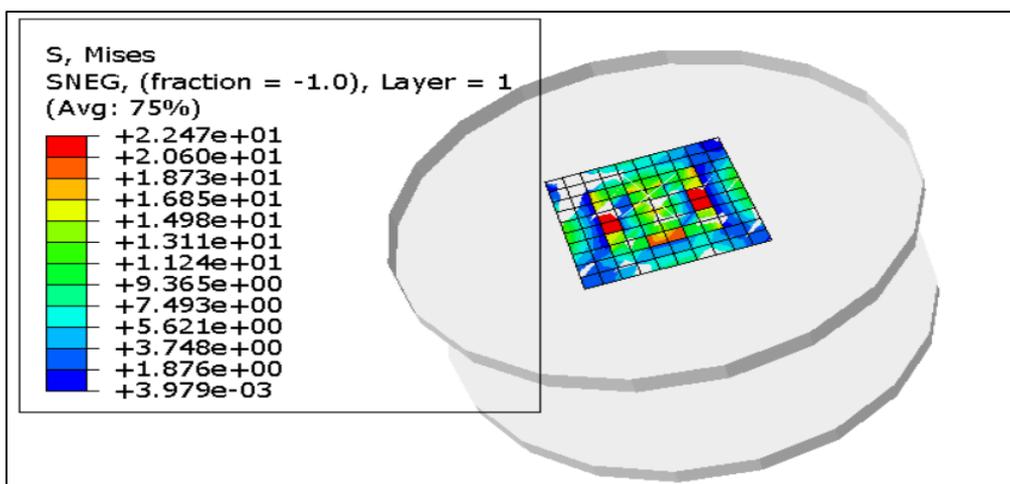
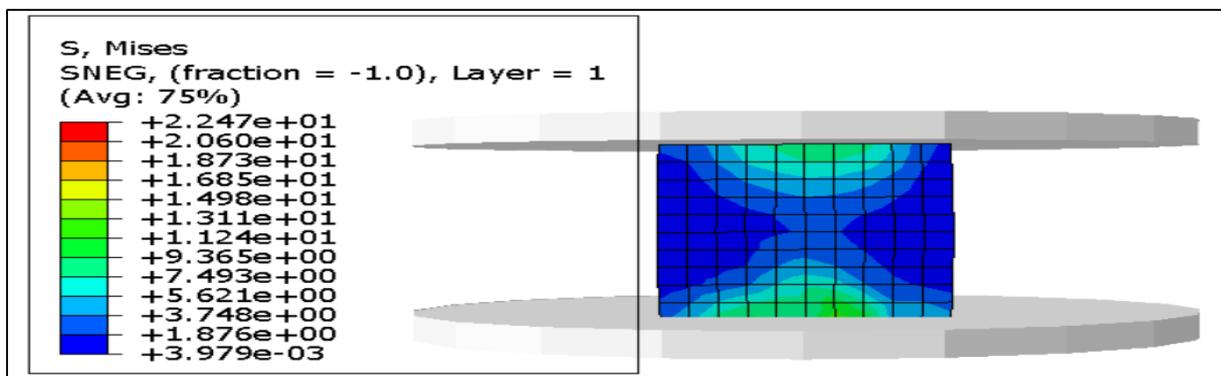


Figure IV- 9: Evolution des contraintes dans les plaques FRP – 6cm.

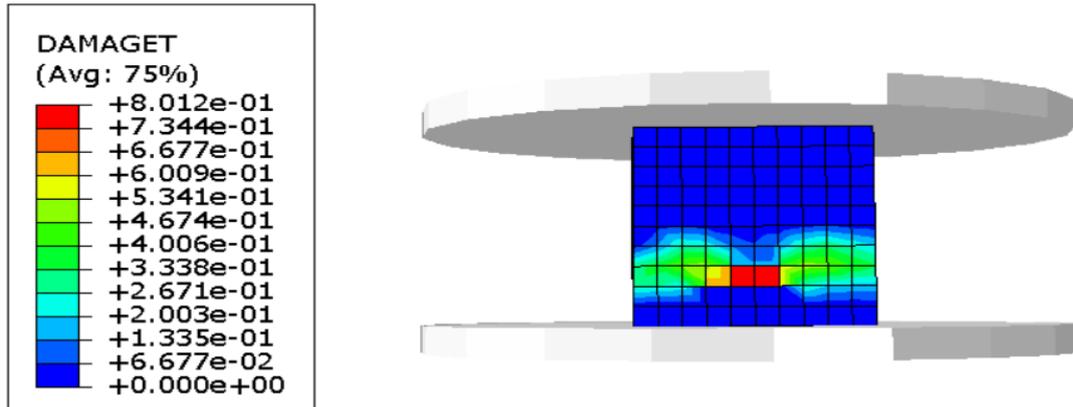


Figure IV- 10: Evolution de l'endommagement dans la poutre.

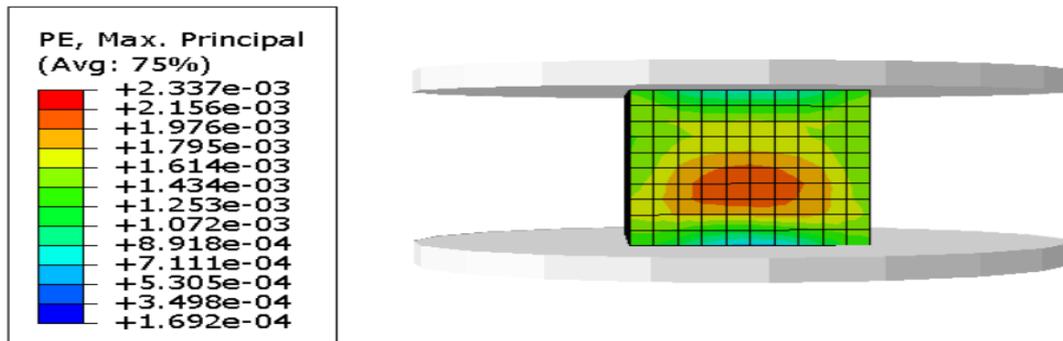
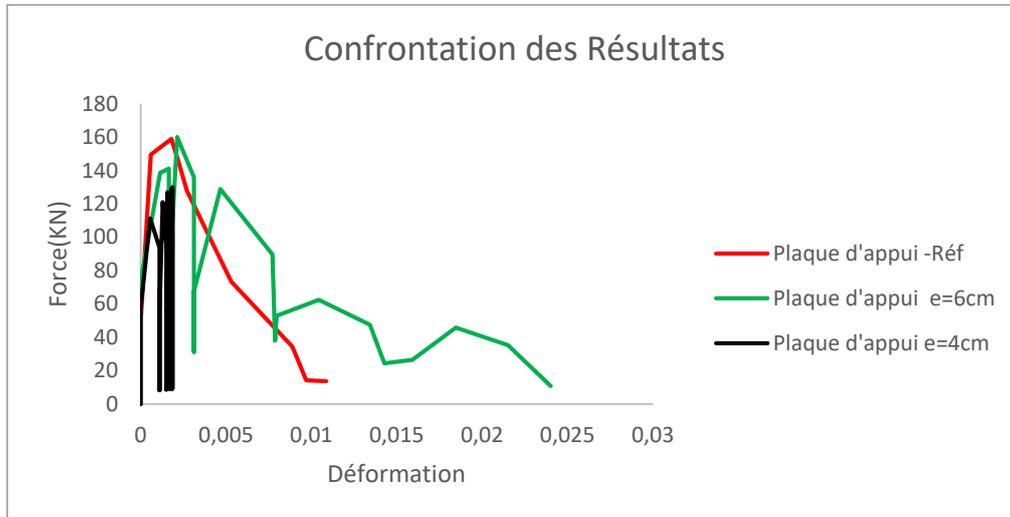


Figure IV- 11: Evolution de la fissuration dans la poutre.

**-Confrontation des résultats**

**Figure IV- 12: Confrontation des courbes Force de rupture – déformation des spécimens d'étude.**

#### IV.8 Analyse des résultats et discussion :

L'examen des valeurs maximales de résistance et des diagrammes de contraintes-déformations met en évidence l'importance de l'épaisseur de la plaque composite sur la gestion des charges compressives appliquées et sur l'amortissement des charges par l'accroissement des déformations tolérables avant la rupture complète de l'élément.

Les résultats indiquent que pour le socle d'appui de référence (S-Ref), la charge de rupture est  $F_{rup} = 158,865$  kN avec une déformation ultime correspondante d'environ 0,00181. En ce qui concerne le socle en béton renforcé par une plaque d'appui d'épaisseur  $e = 4$  cm (SR-4), la charge de rupture est  $F_{rup} = 130,1$  kN avec une déformation de 0,00185. Pour le même type de socle en béton renforcé par une plaque d'appui d'épaisseur  $e = 6$  cm (SR-6), la charge de rupture atteint  $F_{rup} = 160,1$  kN pour une déformation de 0,00185.

Ces conclusions soulignent non seulement l'amélioration de la déformabilité du socle d'appui grâce aux plaques composites, mais aussi la résistance pour une épaisseur de  $e=6$  cm. Dans le cas d'une plaque fine, on note une légère amélioration de la déformabilité qui s'accompagne d'une diminution de la résistance. En revanche, lorsqu'il s'agit d'une plaque épaisse, il y a une amélioration tant de la résistance que de la déformabilité.

Pour l'avenir, il serait pertinent d'optimiser cette épaisseur en ajustant les dimensions des plaques composites et leurs caractéristiques mécaniques. De plus, les endommagements sont généralement plus prononcés pour le socle de référence en béton, tandis que pour les socles hybrides, les dommages et fissures sont moins notables. L'analyse des courbes de force de rupture et de déformation des échantillons examinés met en évidence l'impact de l'épaisseur de la plaque d'appui composite sur la résistance, en particulier sur la déformabilité.

## **CONCLUSION GENERALE**

Nous avons cherché à travers ce mémoire à élaborer des plaques de renforcement en matériau composite en se basant sur la résine époxy à base de différents types de fibres et des fibres hybrides issues de la récupération, dans le but d'évaluer leur efficacité mécanique pour des applications en génie civil.

A travers les résultats obtenus, l'impact et le rôle de renforcement des résines époxy par des fibres sur l'amélioration des performances mécanique de ces plaques d'appuis en composite est mis en évidence.

Les résultats ont démontré que l'incorporation de fibres contribue de manière notable à l'amélioration de la résistance à la traction de la résine époxy. L'augmentation varie d'un minimum de 2 %, pour le cas le moins performant, jusqu'à un maximum de 130 % par rapport à la résine non renforcée.

Cette amélioration de la résistance à la traction dépend de la nature de fibre, sa dimension et de la fraction volumique utilisée. Cependant, la longueur et la fraction volumique sont étroitement liées aux conditions de mise œuvre du mélange et d'ouvrabilité.

"Quelle que soit la nature des fibres utilisées, leur longueur a une influence significative sur la résistance, en relation avec le taux d'incorporation. Les fibres de 1,5 cm ont généré de meilleures performances mécaniques comparées à celles de 1 cm. Par ailleurs, l'augmentation du taux de fibres entraîne une amélioration progressive de la résistance à la traction jusqu'à un seuil de 3 %, au-delà duquel une diminution de la résistance est observée.

"Concernant les fibres polymères issues de la récupération, l'ajout de fibres de 1 cm à un taux de 1 % a permis d'obtenir une amélioration maximale de la résistance à la traction de 7,72 % par rapport à la résine non renforcée. En revanche, l'utilisation de fibres de 1,5 cm avec un taux d'incorporation de 3 % a conduit à une augmentation maximale de 54,77 % de cette même résistance.

"Pour ce qui est des fibres de verre, l'ajout de fibres de 1 cm à une concentration de 3 % a entraîné une amélioration de 46,93 % de la résistance à la traction par rapport à la résine sans renfort. En comparaison, l'utilisation de fibres de 1,5 cm au même taux d'incorporation a permis d'atteindre une augmentation notable de 129,16 %.

Concernant le taux d'ajout des fibres, l'optimisation a permis d'identifier un pourcentage idéal de 2,3 % pour les fibres polymériques recyclées, contre 3 % pour les fibres de verre.

A cet effet, les conclusions tirées indiquent que la dimension  $1,5\text{ cm}$  permet un meilleur renforcement de la résine avec pourcentage optimum varie en 2 à 3 %.

En revanche, la combinaison de la fibre de verre et la fibre en polymère issue à la récupération pour avoir une composition hybride en renforçant la résine, a donné des résultats plus proche à ceux du renforcement par la fibre de polymère que par la fibre de verre qui a donné des résultats très pertinentes. Cela qui met la nécessité de trouver une autre variante différente par rapport à celle considérée dans notre choix sur la dimension et le pourcentage optimum, afin d'améliorer plus la résistance de la fibre hybride.

Les résultats numériques et expérimentales mettent en évidence l'importance de l'épaisseur de la plaque composite sur la gestion des charges compressives appliquées et sur l'amortissement des charges par l'accroissement des déformations tolérables avant la rupture complète de l'élément.

En fait, les résultats trouvés soulignent non seulement l'amélioration de la déformabilité du socle d'appui grâce aux plaques composites, mais aussi la résistance pour une épaisseur de  $e = 6\text{ cm}$  par rapport à l'autre épaisseur  $4\text{ cm}$ . Dans le cas d'une plaque fine, on note une légère amélioration de la déformabilité qui s'accompagne d'une diminution de la résistance. En revanche, lorsqu'il s'agit d'une plaque épaisse, il y a une amélioration tant de la résistance que de la déformabilité.

Finalement, les études menées ont permis de conclure que le renforcement par les divers types de fibres, qu'elles soient seules ou en combinaison, offre une solution intéressante pour renforcer les matériaux composites, tout en s'inscrivant dans une démarche de valorisation des déchets. Ce travail confirme le choix de la longueur ( $1,5\text{ cm}$ ), du taux optimal de dosage entre (2% et 3%) et d'épaisseur plus que ( $6\text{ cm}$ ), sont des facteurs déterminants pour obtenir un bon compromis entre résistance, rigidité et faisabilité des plaques d'appui en résine renforcée.

En perspective, il est souhaitable, de considérer plus de variantes des fibres hybrides afin de trouver la meilleure combinaison qui donnerai une meilleure résistance, et surtout de réaliser plus de tests de caractérisation, et des tests mécaniques statique et dynamique (compression, chocs, vibration ;..) sur des éprouvettes en résine renforcée afin de mieux comprendre le comportement mécanique et de mettre en valeur l'approche proposée.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] B. Jiping, *Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications*. Cambridge: Woodhead, 2013.
- [2] U. Meier *Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites*, Construction and Building Materials, 1995.
- [3] T. Triantafillou, *Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites*, ACI Structural Journal, 1998.
- [4] E.Tossou, *Développement de nouveaux composites hybrides renforcés par des fibres de carbone et de lin : Mise en œuvre et caractérisation mécanique*, Thèse de doctorat, Université de Caen Normandie, 2019.
- [5] S. K. Gopalraj, T. Kärki, *A Study to Investigate the Mechanical Properties of Recycled Carbon Fibre/Glass Fibre-Reinforced Epoxy Composites Using a Novel Thermal Recycling Process*, 2020
- [6] M. Kharoubi, *Contribution à l'étude expérimentale et numérique de stratifiés croisés à renfort unidirectionnel*. Mémoire de Magister, spécialité : Construction, Productique et Énergétique, 2002.
- [7] A. CHAIB, H. HOUARI, CARACTERISATION DE LA RESINE EPOXY LR 285 ET SON DURCISSEUR LH 285 RENFORCEE AVEC DES TISSUS EN FIBRE DE VERRE, MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDES, DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE DES MATERIAUX, 2021.
- [8] G.-H. DELMAS, STRUCTURE ET APPLICATION A L'ELABORATION DE RESINES EPOXY [THESE DE DOCTORAT, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 2011.
- [9] N. KESSOURI, F.Z. KENANE, DEVELOPPEMENT ET APPLICATION D'UNE PEINTURE EPOXYDIQUE MONOCOUCHE ANTICORROSION A FAIBLE TENEUR EN COV, MEMOIRE DE MASTER, GENIE DES PROCEDES, 2016.
- [10] C. BENTRA, A. HASSANINE, ÉTUDE DES PROPRIETES MECANIQUES ET DYNAMIQUES DE COMPOSITE EPOXY-FIBRE, MEMOIRE DE MASTER, SPECIALITE CHIMIE DES MATERIAUX, 2022.

- [11] H. ALLOUI, PROCESSUS DE FABRICATION ET CONTROLE DE QUALITE DE RESINES EPOXY, UNIVERSITE DE BOUIRA , 2018.
- [12] A. S. IZEL KIMYA POLYESTER RESINSDE, <https://www.izelkimya.com/idet/12/17/polyester-resins> , 03/18/2025,
- [13] SCHEM. *LE GUIDE ULTIME SUR LA RESINE POLYESTER : PROPRIETES, UTILISATIONS ET APPLICATIONS*, [HTTPS://WWW.SCHEM.NET/BLOG/THE-ULTIMATE-GUIDE-TO-POLYESTER-RESIN-PROPERTIES-USES-AND-APPLICATIONS /](https://www.schem.net/blog/the-ultimate-guide-to-polyester-resin-properties-uses-and-applications/), 2023.
- [14] V-SURE. POLYURETHANE. <https://www.v-sure.eu/fr/produits/polyurethane/>.
- [15] TF COMPOSITE. RESINES VINYLESTERS STANDARDS. <https://www.tfcomposite.com/fr/resines-vinylesters-standards>.
- [16] LORN CHEMICALS, RESINE ACRYLIQUE LORNACRYLIC R50. LORN CHEMICALS, <https://lorncchemicals.com/produit/resine-acrylique-lornacrylic-r50/>.
- [17] I. E. FERHAT, EFFET DU TYPE DE FIBRES SUR LES PROPRIETES DE L'ADOBE, MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER, 2020.
- [18] TEXTILE LEARNER. GLASS FIBER: TYPES, PROPERTIES, MANUFACTURING PROCESS AND APPLICATIONS. [https://textilelearner.net/glass-fiber-types-properties /](https://textilelearner.net/glass-fiber-types-properties/).
- [19] TEXTILE LEARNER. CARBON FIBER: ITS MANUFACTURING PROCESS AND USES, <https://textilelearner.net/carbon-fiber-its-manufacturing-process-and-uses/>
- [20] TEXTILE LEARNER. *KEVLAR FIBER: TYPES, PROPERTIES, MANUFACTURING*, <https://textilelearner.net/kevlar-fiber-types-properties-manufacturing/>.
- [21] TEXTILE LEARNER, HIGH-PERFORMANCE POLYETHYLENE FIBERS: AN OVERVIEW, SUR : <https://textilelearner.net/high-performance-polyethylene-fibers-an-overview/>.
- [22] TEXTILE LEARNER. POLYPROPYLENE FIBER: PROPERTIES, APPLICATIONS, <https://textilelearner.net/polypropylene-fiber-properties-applications>
- [23] M. BOUTOUGHMAS, A. HACINI, ÉTUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT FLEXIONNEL DES POUTRES RENFORCEES AVEC DES MATERIAUX COMPOSITES PRF. MEMOIRE DE MASTER UNIVERSITE DE BOUIRA , 2023.
- [24] HASSANE NARY, A. *Étude et caractérisation d'un béton renforcé par polymères* [Mémoire de Master]. Université 8 Mai 1945 de Guelma, Juin 2022.

[25] HIBBIT, Karlsson & Sorensen, INC. ABAQUS documentation version 6.14 ; 2014

[26] ABAQUS, Theory Manual, version 6.12 et 6.14, Karlsson H., Abaqus Simulia, HKS Inc Providence, RI USA ; 2013.

[27] J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller and E. Onate « A plastic-damage model for concrete» International Journal Solids Structures 25(3), 299-326; 1989.

[28] Tsai. W. HA S.S., Miyano Y., Tay T.E, «Strength & Life of Composites», edition Aero & Astro, Stanford, USA, 2009.