



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Travaux Publics

Option : Voies et Ouvrage d'Art

Présenté par :

ASLI Imen

BABOU Soulef

Sujet du mémoire

***Analyse mécanique des contraintes d'interface d'une poutre
en béton armé poreuse renforcée par matériaux composites***

Soutenu publiquement le 24/06/2025 devant le jury composé de :

Dr ABDELAZIZ Hadj Henni

Président

Dr RABAHI Abderazak

Encadreur

Dr ZOUATNIA Nafissa

Examineur

Pr HADJI Lazreg

Examineur

Pr AIT AMAR MEZIANE Med

Examineur

2024/2025



Remerciement

Nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour atteindre nos objectifs et accomplir avec succès ce travail.


Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre encadrant, Dr. RABAHI Abderezak, pour son accompagnement, ses conseils précieux et sa disponibilité tout au long de ce travail. Sa rigueur, sa bienveillance et la qualité de son encadrement ont grandement contribué à la bonne réalisation de notre projet. Nous le remercions chaleureusement pour sa confiance, son soutien et l'intérêt qu'il a porté à notre travail.

Nous remercions également les membres du jury qui ont bien voulu consacrer de leur temps à l'évaluation de notre projet de fin d'étude .

Nos remerciements s'adressent aussi à l'ensemble de nos enseignants universitaires, pour la qualité de leur enseignement, leur dévouement et leur contribution précieuse à notre formation tout au long de notre parcours académique.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos familles respectives, pour leur amour inconditionnel, leur soutien moral constant et leurs encouragements, qui ont été essentiels tout au long de cette aventure.

Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance sincère à tous nos amis et collègues. Leur soutien moral, leurs échanges enrichissants et leur bienveillance ont été d'un grand réconfort et ont largement contribué à maintenir notre motivation.



Dédicace

Je dédie sincèrement ce travail à mes parents. Ils m'ont offert un soutien constant et une motivation précieuse tout au long de mes études, me permettant d'atteindre ce point.

Ce projet de fin d'études est directement lié à leurs encouragements, et je les remercie profondément à travers cette simple dédicace. Que Dieu les protège et leurs offre la santé et le bonheur.

A mes chères sœurs Hadjira, Tamani et Ritadj,

A mes chers frères Safa, Omar et Farouk

Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours

A tous les membres du club scientifiques Design and construction, Ils ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail.

A tous mes amis, Pour leur soutien constant et leur présence réconfortante face aux épreuves.

Imen



Dédicace

{ وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ عَلَيْهِ تَوَكَّلْتُ وَإِلَيْهِ أُنِيبُ }

À mes piliers, mes repères, mon cher Père et ma chère Mère ,
C'est avec une gratitude qui dépasse les mots que je vous dédie ce travail. Vos sacrifices incommensurables, votre amour inconditionnel et votre soutien inébranlable ont été la force motrice de ce parcours. Chaque étape, chaque défi relevé, a été inspiré par votre courage et votre foi en mes capacités. Vous m'avez donné les racines pour grandir et les ailes pour voler. Cette réussite est le fruit de vos efforts, de vos prières et de votre présence constante.

À mes merveilleuses sœurs :Souad et Bochra

À mon cher frère : Sidahmed

À tous mes enseignants durant mon cycle d'étude universitaire.

Et en dernier, un grand merci à toutes celles et tous ceux qui d'une manière ou d'une autre m'ont aidé et soutenu et qui ont partagé ma joie en ce jour ci.

Soulef

Sommaire

Liste Des Tableaux	IV
Liste Des Figures.....	V
Résumé	VII
Abstract	VIII
ملخص.....	IX
Introduction Générale	XI
I.1. Introduction.....	1
I.2. Pathologies Et Principales Causes Des Désordres Affectant Les Ouvrages	1
I.2.1. CAUSES CHIMIQUES DE DÉGRADATION DE BÉTONS	1
<input type="checkbox"/> CARBONATATION.....	1
<input type="checkbox"/> LA DÉGRADATION DES BÉTONS DUE À LA CORROSION DES ARMATURES.....	2
I.2.2. CAUSES PHYSIQUES DE DÉGRADATION DE BÉTONS	2
<input type="checkbox"/> LES CYCLES DE GEL-DÉGEL	2
<input type="checkbox"/> RETRAIT DU BÉTON	3
I.2.3. CAUSES MÉCANIQUES DE DÉGRADATION DE BÉTONS	4
<input type="checkbox"/> TASSEMENT DIFFÉRENTIEL	4
<input type="checkbox"/> SÉISME	4
<input type="checkbox"/> MODIFICATION DES CONDITIONS D'EXPLOITATION DES OUVRAGES.....	5
I.2.4. DÉSORDRES DUS AUX ERREURS DE CONCEPTION OU D'EXÉCUTION	5
I.3. Méthodes Et Techniques De Renforcement.....	6
I.3.1. MÉTHODES DE RÉPARATION NON STRUCTURALES	7
I.3.2. MÉTHODES DE RÉPARATION STRUCTURALE.....	7
<input type="checkbox"/> RÉPARATION PAR BÉTON PROJETÉ.....	8
<input type="checkbox"/> RÉPARATION PAR ADJONCTION D'ARMATURE COMPLÉMENTAIRE	9
<input type="checkbox"/> RÉPARATION PAR PRÉCONTRAINTÉ ADDITIONNELLE	9
<input type="checkbox"/> RENFORCEMENT PAR COLLAGE DE PLATS MÉTALLIQUES.....	10
I.4. Réparation Et Renforcement Par Collage Des Matériaux Composites	11
1.4.1. UTILISATION DES COMPOSITES DANS LE GÉNIE CIVIL.....	12
1.4.2. REMPLACEMENT DES TÔLES MÉTALLIQUES PAR DES MATÉRIAUX COMPOSITES.....	12
1.4.3. APPLICATION DES MATÉRIAUX COMPOSITES POUR LA RÉPARATION ET LE RENFORCEMENT DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ	13
I.5. Conclusion	18
II.1 Introduction	20
II.2. Définition Des Matériaux Composites	20
II.3. Avantages Et Inconvénients Des Composites.....	21
II.3.1. AVANTAGES.....	21
II.3.2. INCONVÉNIENTS	22
II.4. Classification Des Matériaux Composites	22
II.4.1. COMPOSITE À FIBRES.....	22
II.4.2. COMPOSITE À PARTICULES	24

II.5. Les Éléments Constituant Le Matériau Composite Á Base Des Fibres	24
II.5.1. LES RENFORTS	24
□ FIBRES DE CARBONE.....	25
□ FIBRES DE VERRE	26
□ FIBRES D'ARAMIDE	26
II.5.2. LES MATRICES	27
II.5.2.1. LES MATRICES ORGANIQUES	28
□ RÉSINES THERMODURCISSABLES	28
□ RÉSINES THERMOPLASTIQUES	28
II.5.2.1. LES MATRICES MÉTALLIQUES	29
II.5.3. COMPARAISON ENTRE CES DEUX TYPES DE RÉSINES	30
II.6. L'utilisation Des Composites Dans Le Domaine De Génie Civil	31
II.6.1. MÉCANIQUE	31
II.6.2. AMÉLIORATION DE LA SÉCURITÉ	31
II.6.3. AMÉLIORATION DE CERTAINES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES	31
II.6.4. RECHERCHE D'EFFET DÉCORATIF	31
II.7. Conclusion	32
III.1. Introduction.....	34
III.2. Comportement Mécanique D'une Section De Poutre En Béton Armé Renforcée	34
III.3. Mécanisme De Rupture Des Poutres Renforcées Par Matériaux Composites ...	36
III.3.1. RUPTURE DUE À LA FLEXION.....	37
III.3.2. RUPTURE DUE AU CISAILLEMENT	37
III.3.3. RUPTURE DUE AU DÉCOLLEMENT.....	38
III.4. Facteurs Ayant Une Influence Sur Le Comportement Des Poutres Renforcées	39
II.4.1. INFLUENCE DU RAPPORT DE LA DISTANCE ENTRE LA CHARGE ET L'APPUI PAR RAPPORT À LA HAUTEUR DE LA SECTION	40
II.4.2. INFLUENCE DU TAUX DE RENFORCEMENT DES ARMATURES TENDUES	41
II.4.3. INFLUENCE DE LA LONGUEUR DE LA PLAQUE COMPOSITE.....	42
II.4.4. INFLUENCE DE LA QUANTITÉ DU COMPOSITE	44
III.5. Conclusion	47
Iv.1. Introduction.....	49
Iv.2. Analyse	49
IV.2.1. EQUATIONS D'ÉLASTICITÉ	50
IV.2.2. LA DISTRIBUTION DES CONTRAINTES DE CISAILLEMENT DANS L'INTERFACE COMPOSITE – BÉTON	51
IV.2.3. LA DISTRIBUTION DES CONTRAINTES NORMALES DANS L'INTERFACE COMPOSITE – BÉTON	54
Iv.3. Conclusion	55
V.1. Introduction	58
V.2. Présentation Du Modèle	58
V.2.1. VALIDATION DU MODÈLE	59

V.4. Etude Paramétrique Pour Une Poutre Rectangulaire	60
V.4.1. EFFET DE LA LONGUEUR NON RENFORCÉE « A ».....	61
V.4.2. EFFET DE TA.....	62
V.4.3. EFFET DE T ₂	63
V.4.4. EFFET DE E _A	65
V.4.5. EFFET DE E _{F2}	67
V.5. Etude Paramétrique Pour Une Poutre En Té	67
V.5.1. EFFET DE A.....	67
V.5.2. EFFET DE EA	69
V.5.3. EFFET DE T ₂	70
V.5.4. EFFET DE TA.....	72
V.5.5. EFFET DE EF ₂	73
V.6. Conclusion	74
Conclusion Générale	62
Référence Bibliographique	

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Propriétés des fibres.....	27
Tableau II.2: Caractéristiques des résines thermodurcissables.	28
Tableau II.4 : Tableau de comparaison des thermoplastiques vs thermodurcissables.	30
Tableau III.1 : Influence de la longueur du renforcement sur la résistance ultime et le mode de rupture.....	43
Tableau III .2 : Influence de la quantité du composite sur la résistance ultime	44
Tableau.III.3: Influence du type d’ancrage sur la résistance ultime des poutres renforcées .	46
Tableau V.1: Propriétés géométriques et mécaniques des matériaux.	59
Tableau V.2 : Chargement et géométrie.....	59
Tableau V.3 : Effet de la longueur non renforcée a sur les contraintes d’interface pour une poutre en ba poreuse renforcée par matériau composite (section rectangulaire).	61
Tableau V.4 : Effet de l’épaisseur de l’adhésif ta sur les contraintes d’interface pour une poutre en béton armé poreuse renforcée par matériau composite (section rectangulaire).	63
Tableau V.5 : Effet de l’épaisseur t ₂ sur les contraintes d’interface pour une poutre en béton armé poreuse renforcée par matériau composite (section rectangulaire).	64
Tableau V.6. Effet de la rigidité de la couche d’adhésive ea sur les contraintes d’interface pour une poutre en ba poreuse renforcée par matériau composite (section rectangulaire).	66
Tableau V.7 : Effet de la longueur non renforcé a sur les contraintes d’interface pour une poutre en ba poreuse renforcée par matériaux composites (section en t).....	68
Tableau V.8 : Effet de la rigidité de la couche d’adhésive ea sur les contraintes d’interface pour une poutre en ba poreuse renforcée par matériaux composites (section en t).	69
Tableau V.9 : Effet de l’épaisseur de la plaque composite t ₂ sur les contraintes d’interface pour une poutre en ba poreuse renforcée par matériaux composites (section en t).	71
Tableau V.10 : Effet de l’épaisseur de la couche d’adhésive ta sur les contraintes d’interface pour une poutre en ba poreuse renforcée par matériaux composites (section en t).	73

Liste des figures

Figure I.1: Processus de carbonatation	1
Figure I.2 : Influence de la corrosion des armatures	2
Figure I.3 : Effet du gel-dégel sur le béton : écaillage du béton d'enrobage et corrosion des armatures.....	3
Figure I.4 : Fissuration du béton.....	3
Figure I.5 : Tassement différentiel.	4
Figure I.6 : Séisme de niigata 1964 quartier kawagishi-cho.	5
Figure I.7: Réparation de poutre par béton projeté.....	8
Figure I.8: Réparation de poutre par adjonction d'armature.	9
Figure I.9: Différents types de reparation par precontrainte additionnel.	10
Figure I.10: Renforcement par plats métalliques.....	11
Figure I.11: Organigramme de comparaison entre tôle métallique et matériaux composites.	13
Figure II.1 : Description d'un matériau composite.....	21
Figure II.2 : Constituants d'un matériau composite.....	21
Figure II.3 : Différentes architectures des renforts de composite : a) mats de verre, b) tissu unidirectionnel, c) tissu bidirectionnel.	23
Figure II.4 : Les différentes catégories de renforts principaux.	25
Figure II.5 : Fibre de carbone.	25
Figure II.6 : Fibre de verre.....	26
Figure II.7 : Histogramme des propriétés en traction des fibres.....	27
Figure II.8 : Classification des matrices.	29
Figure II.9 : Thermodurcissable vs thermoplastique.	30
Figure III.1 : Les trois phases de comportement d'une poutre en béton armé fléchie renforcée par un stratifié en composite: 1nf : 1er niveau de pré fissuration ; 2nf : 2ème niveau de pré fissuration lors des essais de pré fissuration.....	35
Figure III.2 : Comportement structural d'une poutre renforcée.	36
Figure III.3 : Schéma typique de poutre en ba réparée par le collage de composite endommagée par flexion et par la rupture de tissu.....	37
Figure III.4 : Schéma typique de poutre en ba renforcée par le collage de composite endommagée par flexion et par l'écrasement du béton comprimé.....	37
Figure III.5 : Rupture en cisaillement de la poutre.....	38
Figure III.6 : Rupture d'une poutre renforcée par décollement du renfort.....	39
Figure III.7 : Définition des paramètres.....	40
Figure III.8 : Influence de taux de renforcement des armatures tendues d'après.....	42

Figure IV.1 : Poutre en béton armé simplement appuyée renforcée par une plaque composite. 49

Figure IV.2 : Un segment différentiel de la poutre en béton renforcée par collage de composite 50

Figure V.1 : Les caractéristiques géométriques des poutres en béton armé étudiées. 58

Figure V.2 : Comparaison des contraintes d'interface d'une poutre en ba poreuse renforcée par matériaux composites : cas d'une section rectangulaire. 60

Figure V.3 : Effet de la longueur non renforcée a sur les contraintes d'interface pour une poutre en béton armé poreuse renforcée par matériau composite (section rectangulaire). 62

Figure V.4 : Effet de l'épaisseur de l'adhésif t_a sur les contraintes d'interface pour une poutre en béton armé poreuse renforcée par matériau composite (section rectangulaire). 62

Figure V.5 : Effet de l'épaisseur t_2 sur les contraintes d'interface pour une poutre en béton armé poreuse renforcée par matériau composite (section rectangulaire). 65

Figure V.6. Effet de la rigidité de la couche d'adhésive e_a sur les contraintes d'interface pour une poutre en ba poreuse renforcée par matériau composite (section rectangulaire). 65

Figure V.7 : Effet de module d'élasticité e_f sur les contraintes d'interface pour une poutre en béton armé poreuse renforcée par matériau composite (section rectangulaire). 67

Figure V.8 : Effet de la longueur non renforcé a sur les contraintes d'interface pour une poutre en ba poreuse renforcée par matériaux composites (section en t)..... 67

Figure V.9 : Effet de la rigidité de la couche d'adhésive e_a sur les contraintes d'interface pour une poutre en ba poreuse renforcée par matériaux composites (section en t). 69

Figure V.10 : Effet de l'épaisseur de la plaque composite t_2 sur les contraintes d'interface pour une poutre en ba poreuse renforcée par matériaux composites (section en t). 71

Figure V.11 : Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive t_a sur les contraintes d'interface pour une poutre en ba poreuse renforcée par matériaux composites (section en t). 72

Figure V.12 : Effet de module d'élasticité e_f sur les contraintes d'interface pour une poutre en ba poreuse renforcée par matériaux composites (section en t)..... 74

Résumé

En génie civil, la pathologie des structures consiste à identifier l'origine des dégradations et à proposer des solutions de réparation durables, nécessitant un diagnostic approfondi. Le choix des méthodes et matériaux de réparation est complexe, dépendant de la nature des désordres, des contraintes économiques et des particularités du site.

Le renforcement ou la réparation repose sur l'ajout de matière aux zones trop sollicitées, soit par excès d'efforts (renforcement), soit par dégradation de la résistance (réparation).

L'utilisation de matériaux composites collés pour le renforcement est prometteuse, mais le décollement de la plaque composite, dû à de fortes contraintes d'interface près des bords, constitue le défi majeur. Ce travail vise à une étude analytique des contraintes d'interface dans les poutres en béton armé poreuses renforcées par composites hybrides et voir les différents facteurs influençant sur le décollement de la plaque de renforcement.

Mots clés : Poutre en béton armé, renforcement, Matériaux composites, décollement.

Abstract

In civil engineering, structural pathology involves identifying the origin of damage and proposing sustainable repair solutions, requiring a thorough diagnosis. The choice of repair methods and materials is complex, depending on the nature of the damage, economic constraints, and site characteristics.

Strengthening or repair relies on adding material to overstressed areas, either due to excessive stress (reinforcement) or due to strength degradation (repair).

The use of bonded composite materials for reinforcement is promising, but debonding of the composite plate, due to high interface stresses near the edges, poses a major challenge. This work aims to conduct an analytical study of interface stresses in porous reinforced concrete beams reinforced with hybrid composites and to examine the various factors influencing debonding of the reinforcement plate.

Keywords: Reinforced concrete beam, reinforcement, composite materials, detachment.

ملخص

في الهندسة المدنية، يتضمن علم الأمراض الإنشائية تحديد مصدر الضرر واقتراح حلول إصلاح مستدامة، مما يتطلب تشخيصًا شاملاً. يُعد اختيار أساليب ومواد الإصلاح أمرًا معقدًا، ويعتمد على طبيعة الضرر والقيود الاقتصادية وخصائص الموقع.

يعتمد التقوية أو الإصلاح على إضافة مواد إلى المناطق المُجهدة، إما بسبب الإجهاد المفرط (التسليح). أو بسبب تدهور القوة (الإصلاح).

يُعد استخدام المواد المركبة الملتصقة للتسليح أمرًا واعدًا، إلا أن فك ارتباط الصفيحة المركبة، بسبب الإجهادات السطحية العالية بالقرب من الحواف، يُمثل تحديًا كبيرًا. يهدف هذا العمل إلى إجراء دراسة تحليلية لإجهادات السطح البيني في عوارض الخرسانة المسلحة المسامية المقواة بمواد مركبة هجينة، ودراسة العوامل المختلفة المؤثرة على فك ارتباط صفيحة التسليح.

الكلمات المفتاحية: المواد المركبة، الرافدة المعدنية، الصاق، انفصال، الجهدات السطحية، اللوحة المتدرجة

وظيفيا

Introduction Générale

Introduction Générale

Dans le domaine du génie civil, la pathologie des structures consiste à identifier l'origine des problèmes et des défaillances que rencontrent les ouvrages. Son objectif est de trouver des solutions durables pour remédier à ces détériorations.

D'une part, le terme "pathologie" décrit donc l'ensemble des altérations subies par les structures et leurs composants. Avant toute intervention de réparation, il est crucial de réaliser un diagnostic approfondi pour comprendre les causes exactes des dégradations, surtout si elles ne sont pas immédiatement évidentes. Cette étape est essentielle pour choisir la méthode de réparation la plus efficace et garantir la longévité de la structure.

D'autre part, la sélection de la méthode de réparation et des matériaux appropriés pour une structure n'est pas une mince affaire. Cette décision est multifactorielle et doit impérativement considérer la nature et l'ampleur des désordres observés, tout en intégrant des paramètres cruciaux tels que les contraintes économiques liées aux matériaux de construction, les conditions spécifiques du chantier et les particularités du site.

Le principe fondamental du renforcement ou de la réparation repose sur l'apport de matière additionnelle aux zones où les sections structurales sont soumises à des sollicitations excessives. Une section est jugée "trop sollicitée" si, en raison des dispositions constructives initiales ou d'une modification des conditions d'exploitation, les efforts appliqués excèdent les capacités prévues lors du dimensionnement (ce qui relève du problème de renforcement), ou si sa résistance intrinsèque a diminué suite à une dégradation (relevant alors du problème de réparation).

L'utilisation des matériaux composites pour la réparation des structures en génie civil est devenue une approche très prometteuse. Cette technique implique généralement le collage de plaques composites sur les éléments de la structure, comme les poutres.

Cependant, le principal défi et le mode de rupture le plus critique pour ces poutres renforcées est le décollement de la plaque composite. Ce phénomène est dû à des contraintes d'interface élevées qui se concentrent près des bords de la plaque collée. Pour anticiper et prévenir ce type de défaillance, il est donc essentiel de pouvoir prédire ces contraintes avec précision.

Notre travail s'inscrit dans cette optique : nous allons réaliser une analyse mécanique des contraintes d'interface pour des poutres en béton armé, y compris celles présentant une

certaine porosité, renforcées par collage de matériaux composites. Une étude paramétrique sera également menée pour identifier les facteurs clés qui influencent le décollement de la plaque composite.

Ce mémoire est organisé en cinq chapitres distincts, structurés comme suit :

Le premier chapitre, décrira, à travers une étude bibliographique les pathologies ainsi que les différentes techniques de réhabilitation des structures en béton armé par matériaux composites.

Le deuxième chapitre, sera consacré à une revue d'ensemble sur les matériaux composites et leurs différentes propriétés.

Le troisième chapitre, il sera également exposé dans ce chapitre les modes de rupture des poutres en béton armé renforcée par composites couramment rencontrés.

Le quatrième chapitre, portera une analyse mécanique des contraintes d'interface d'une poutre en béton armé poreuse renforcée par matériaux composites.

Le cinquième chapitre, montrera la validation du présent modèle avec celle littérateurs et une étude paramétrique (l'effet de plusieurs paramètres).

Et enfin, une conclusion générale.

CHAPITRE I

Pathologies et techniques de réparation des ouvrages en béton armé

I.1. Introduction

Dans le domaine du génie civil, la pathologie vise à identifier les origines des symptômes et des défaillances des structures, avec pour but de trouver des solutions à ces manifestations de détérioration.

On utilise le terme pathologie pour décrire les détériorations subies par les ouvrages et les Structures de leurs éléments. Avant d'entreprendre toute réparation, il est essentiel d'effectuer un diagnostic et d'explorer les sources de dégradation lorsque celles-ci ne sont pas manifestes. Effectivement, cette étape est indispensable pour sélectionner la réparation la plus durable. Voici un aperçu des principales pathologies touchant les structures en béton armé, classées selon leur source d'origine.

I.2. Pathologies et principales causes des désordres affectant les ouvrages

Les pathologies et les désordres qui touchent les structures sont des enjeux fréquents dans les secteurs de la construction, de l'ingénierie civile et de l'architecture. Ces difficultés peuvent résulter de divers facteurs.

I.2.1. Causes chimiques de dégradation de bétons

✚ Carbonatation

La carbonatation des composés hydratés du ciment par dioxyde de carbone de l'air (CO_2) Diminue le pH de la solution interstitielle d'une valeur de l'ordre du pH 12,6 à une valeur Inférieure à pH 9 de telle sorte que la pellicule d'oxyde passif protégeant l'acier n'est plus Stable. En effet, les résistances mécaniques et les modules d'élasticité augmentent, tandis que La perméabilité et la porosité diminuent grâce à la formation des carbonates de calcium. (GHLIB and FERHAT, 2020).

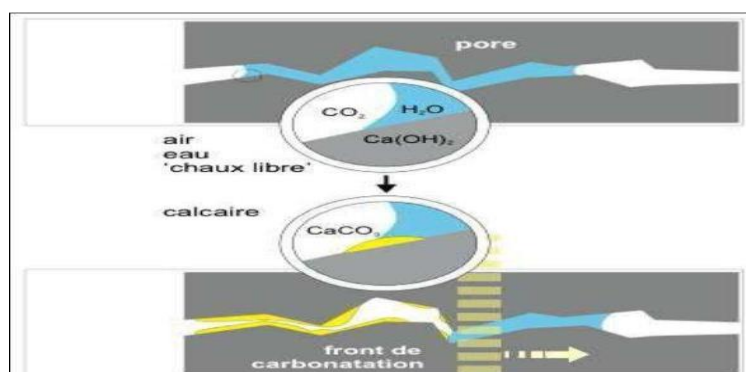


Figure I.1: Processus de carbonatation (GHLIB and FERHAT, 2020).

✚ La dégradation des bétons due à la corrosion des armatures

Lors du coulage du béton, l'eau de gâchage réagit avec l'acier et forme une couche protectrice d'hydroxyde de fer $[Fe(OH)_2]$ et de calcium $[Ca(OH)_2]$. Ainsi, la solution interstitielle du béton aura un PH élevé, de l'ordre de 13.

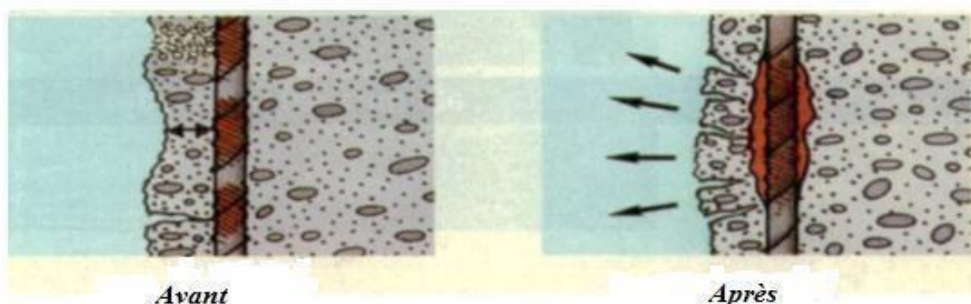


Figure I.2 : Influence de la corrosion des armatures. (BADOUR, 2018).

Si la solution interstitielle ne convient plus à un béton sain, comme dans le cas de la carbonatation et la pénétration des ions chlorure, cette couche protectrice disparaît. Les produits, oxydes et hydroxydes, des oxydations au niveau de la surface de l'acier s'accumulent, entraînant un gonflement, par suite la fissuration de l'enrobage. (BADOUR, 2018).

I.2.2. Causes physiques de dégradation de bétons

✚ Les cycles de gel-dégel

L'eau infiltrée dans le béton augmente de 9 % en volume lors du gel. Cette augmentation de volume engendre des contraintes internes créant ainsi des fissurations [Ferrier E. 1999]. La succession des cycles d'humidification et de gel élargit peu à peu ces micro-fissures qui amèneront la destruction en surface du béton, sous la forme de plaquettes (**figure I.3**).

La dégradation par gel-dégel est amplifiée par des chocs thermiques. En effet, la chaleur de fusion de la glace est de 80 cal/kg. Cette chaleur est empruntée au voisinage immédiat du lieu où se trouve la glace, cette couche se trouve alors soumise à une chute brutale de température qui passe en dessous de 0°C, et l'on aboutit à des sollicitations dans le béton de type choc thermique. L'une des méthodes les plus employées pour pallier les problèmes de gel-dégel est l'emploi, au moment de la mise en œuvre, d'adjuvant tels que des entraîneurs d'air. La principale fonction de ces entraîneurs d'air est de créer des vides permettant de compenser le gonflement du béton. (El Houssain, 2004).



Figure I.3 : Effet du gel-dégel sur le béton : écaillage du béton d'enrobage et corrosion des armatures. (BOUACHRIA and KARI, 2021).

✚ Retrait du béton

Au cours d'une sorption d'eau (réhumidification) ou d'une désorption (séchage), le matériau subit une variation dimensionnelle, qui peut être un gonflement ou une déformation de retrait. Les trois principaux types de retrait sont :

- Le retrait plastique, qui peut affecter le béton au très jeune âge et qui est causé par une évaporation trop rapide de l'eau en surface ;
- Le retrait endogène, lié au processus de réorganisation de l'eau dans la pâte de ciment ;
- Le retrait de dessiccation causé par le séchage du matériau du fait du déséquilibre hygrométrique avec le milieu extérieur. **(BOUACHRIA and KARI, 2021).**



Figure I.4 : Fissuration du béton. (BOUACHRIA and KARI, 2021).

I.2.3. Causes mécaniques de dégradation de bétons

✚ Tassement différentiel

Des tassements différentiels des fondations peuvent entraîner une fissuration. Les mouvements d'appuis sont dus soit à des affouillements, soit à des glissements de terrain. Ils entraînent dans la structure des déformations importantes. Certains de ces mouvements sont visibles à l'œil nu, d'autres nécessitent une comparaison des nivellements avant et après les tassements. **(BOUACHRIA and KARI, 2021).**



Figure I.5 : Tassement différentiel. (BADOUR, 2018).

✚ Séisme

Même léger, un séisme peut être la source de désordres importants. Ceux-ci sont à craindre au niveau des fondations (effet de vibration modifiant la consistance du sol d'assise), aux liaisons piles/poutres (effet de cisaillement dû à la secousse), aux fixations, ancrages, assemblages qui auront eu à souffrir de soulèvement, torsion ou arrachage des pièces qu'ils maintenaient. Sans aboutir forcément à l'effondrement de l'ouvrage, de tels événements peuvent gravement endommager des éléments porteurs de celui-ci. La stabilité de la construction ne sera plus ainsi assurée. **(BOUACHRIA and KARI, 2021).**



Figure I.6 : Séisme de Niigata 1964 Quartier Kawagishi-Cho (BOUACHRIA and KARI, 2021).

✚ Modification des conditions d'exploitation des ouvrages

Il est possible de justifier la nécessité de renforcer ou d'améliorer la portance d'un ouvrage en fonction de l'évolution du trafic ou de la voirie. Les modifications des conditions de chargement résultent fréquemment soit d'une révision des charges réglementaires sur essieux, soit d'une altération de la fréquence des sollicitations appliquées. Il convient également de mentionner la nécessité, dans certains cas, de prendre en compte des sollicitations extrêmes (d'origine climatique ou accidentelle) qui avaient été sous-estimées lors de la construction de l'ouvrage. C'est notamment le cas pour la mise en conformité des ponts ou des bâtiments face aux sollicitations sismiques ou pour le renforcement de certains éléments de l'ossature (piles de pont, poutres latérales) vis-à-vis de sollicitations accidentelles telles que les impacts de véhicules.

I.2.4. Désordres dus aux erreurs de conception ou d'exécution

Les défauts de conception et d'exécution sont la cause de nombreux dommages. Les origines sont diverses :

✚ Au stade de la conception

- Des calculs de dimensionnement et une vérification insuffisante ;
- L'absence de dispositions pour les variations dimensionnelles ;
- Des détails constructifs inadéquats pour la transmission des efforts (par exemple, zones de contraintes concentrées, poussée au vide, mauvaise reprise de bétonnage) ;

- L'acceptation de déformations excessives ;

✚ Au stade de l'exécution

- Insuffisance des documents d'exécution :
- Insuffisance de leur vérification par le maître d'œuvre ;
- Non-respect des documents contractuels ;
- Absence des dessins de détail dont dépend la faisabilité.
- Déficiences du contrôle de qualité :
- Qualité insuffisante ou défectueuse des matériaux ;
- Insuffisance ou absence de contrôle (entrepreneur et maître d'œuvre) à la mise en œuvre des aciers et des bétons ;
- Non-respect des prescriptions technologiques (adjuvants, gel, eaux, décoffrages...) ;
- Non-respect des règles de l'art, fausses manœuvres, mauvaise qualification du personnel.

✚ Dégradation des matériaux

La fissuration d'une structure en béton armé, lorsqu'elle est peu visible et limitée aux zones en traction, peut être en général considérée comme normale. Le fonctionnement logique d'une pièce en béton armé prévoit localement un certain nombre de fissures très fines sans qu'il y ait lieu de s'alarmer. (BENARBIA, 2018).

I.3. Méthodes et techniques de renforcement

Le choix de la méthode de réparation et des matériaux à mettre en œuvre est défini en fonction de la nature et de l'importance des désordres constatés, en tenant compte des critères économiques des matériaux de construction, des conditions de chantier et des contraintes de site. Le principe du renforcement ou de la réparation consiste en adjonction de matière dans les zones où les sections sont trop sollicitées. Une section devient trop sollicitée si, du fait même des dispositions adoptées ou du changement des conditions d'exploitations, les efforts appliqués sont supérieurs à ceux pris en compte dans les calculs (problème du renforcement), ou bien si la résistance a diminué par suite de dégradation (problème de la réparation).

Selon les cas étudiés, il est nécessaire de faire intervenir la notion de PROTECTION de l'ouvrage visant à assurer par exemple des fonctions d'étanchéité ou à limiter les phénomènes de corrosion, la notion de REPARATION visant à restituer les caractéristiques initiales de portance (rigidité – résistance) et éventuellement, la notion de RENFORCEMENT ayant pour objectif d'améliorer les performances de la structure vis-à-vis de conditions d'exploitations modifiées ou d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage. Différentes technologies de réparation et de maintenance des ouvrages sont couramment utilisées depuis de nombreuses années. **(El Houssain, 2002).**

I.3.1. Méthodes de réparation non structurales

L'existence de fissures au niveau d'un élément structural peut entraîner des désordres grave s'ils ont sous-estimé, qui peut atteindre une perte de portance ou bien un dysfonctionnement qui influe sur l'ensemble de la structure, la distribution déséquilibrée des efforts contribue à la dégradation du béton et l'apparition des armatures de ferrailages,

Donc un contact direct des armatures avec l'atmosphère provoquant sa corrosion, et là on est dans un état avancé de gravité, donc les méthodes de reprise de ce béton dégradé doivent être appliquées si l'on veut éviter d'avoir recours dans l'avenir à des techniques de réparation et/ou de renforcement plus onéreuses et parfois plus délicates à mettre en suvre. Et dans le cas d'utilisation de méthodes plus lourdes, ces méthodes légères seront utilisées afin de restaurer un bon état de surface.

La réparation par reprise du béton dégradé suit généralement l'ordre chronologique suivant :

- Préparation de la surface de béton à réparer,
- Traitement des armatures éventuellement exposées,
- Mise en œuvre d'un ou de plusieurs matériaux d'apport,
- Protection du parement ainsi réparé. **(GHLIB and FERHAT, 2020).**

I.3.2. Méthodes de réparation structurale

On peut procéder à la réparation et/ou au renforcement des structures en béton armé soit par l'ajout de forces (comme dans le cas de la précontrainte supplémentaire), soit par l'augmentation de la matière (béton projeté, ajout d'armature supplémentaire et renforts collés tels que les plaques d'acier ou composites).

✚ Réparation par béton projeté

La technique de projection du béton a d'abord été utilisée pour réparer des structures endommagées et conforter des tunnels. Cette technique a ensuite bénéficié de nombreuses évolutions pour être actuellement utilisée de façon courante en réparation et renforcement d'ouvrages, afin de mettre en place des matériaux lorsque les moyens traditionnels de mise en œuvre s'avèrent moins adaptés ou plus coûteux.

Il existe deux techniques principales de projection du béton, dont la différence principale réside dans la chronologie des opérations élémentaires : une projection par voie sèche (avec ou sans pré-mouillage) et une projection par voie mouillée (à flux dilué ou à flux dense).

La plupart des adjuvants et additions utilisés dans la fabrication des bétons mis en place par coulage peuvent être incorporés dans le béton projeté.

La nature de ces ajouts est à adapter au mode de projection utilisé. En fait, la plupart des matériaux employés, pour fabriquer des bétons spéciaux mis en œuvre par coulage sont utilisables pour élaborer des bétons projetés particuliers :

- Les bétons projetés légers à base de granulats légers (argiles ou schiste expansé)
- Les bétons projetés de fibres à base de fibres métalliques, mais aussi à base de fibres de verre.
- Les bétons projetés avec incorporation de fumé de silice.

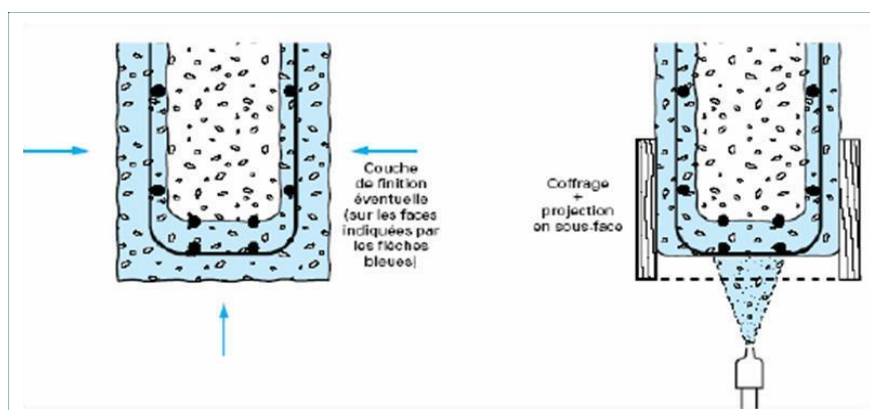


Figure I.7: Réparation de poutre par béton projeté (AIT AMAR, 2025).

Il y'a lieu de faire une distinction entre le béton et le mortier projeté utilisés en réparation de structures. La dimension maximale des granulats utilisés permet de différencier le mortier du béton. Le mortier à des granulats dont la dimension est inférieure ou égale à 5mm. Le béton contient des granulats dont la dimension peut aller jusqu'à 16mm en voie sèche et 12mm en voie mouillée, ces valeurs sont celles actuellement compatibles avec le matériel

couramment utilisé et correspondant à celle du mélange avant projection. (BENARBIA, 2018).

✚ Réparation par adjonction d'armature complémentaire

Cette technique est basée sur l'ajout d'armatures pour remplacer l'acier corrodé Renforcer la structure ; Ces armatures ajoutée traite les fissures et contribue à la résistance des Sections renforcées nous protégeons le renforcement ajouté en par les couvrir par béton coulé Ou projeté ; il y a une possibilité de liée les armatures anciennes et les nouveaux par le Recouvrement ou la soudure. (Figure I.8).(BENIDA and BELMOKHTAR, 2023).

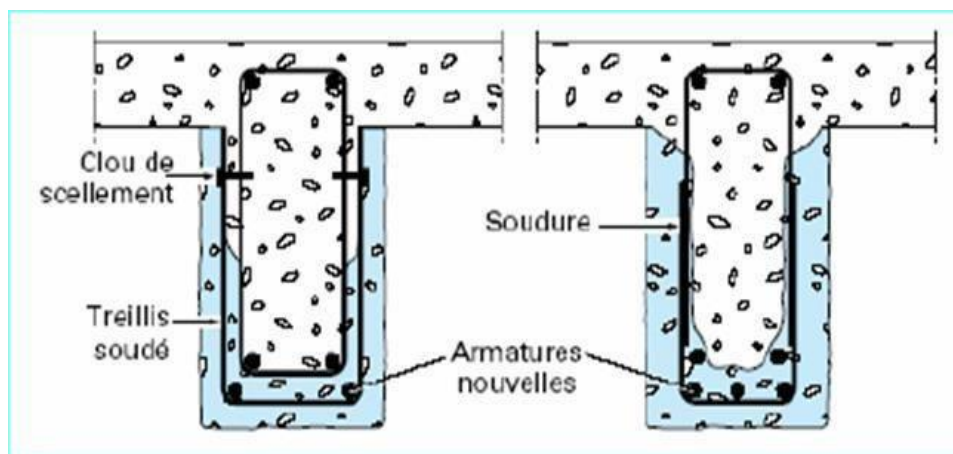


Figure I.8: Réparation de poutre par adjonction d'armature. (AIT AMAR, 2025).

✚ Réparation par précontrainte additionnelle

La précontrainte additionnelle est une méthode de réparation ou de renforcement utilisée sur des ouvrages existants pour les consolider, soit lorsqu'un désordre a affaibli les structures, soit lorsqu'il est prévu d'augmenter les sollicitations initiales, dans le cadre d'un changement de destination par exemple.

Elle utilise des câbles de précontrainte ou des torons gainés graissés qui peuvent être mis en œuvre à l'intérieur de l'ouvrage mais qui, la plupart du temps, sont placés à l'extérieur, ce qui facilite leur surveillance. Ces éléments tendus vont compléter ceux existants, compensant ainsi les faiblesses de dimensionnement initial repérées sur l'ouvrage.

Ces éléments de renfort doivent apporter ainsi une compression additionnelle dans les zones tendues afin de les renforcer. Il faudra toutefois veiller à ce que cette modification n'augmente pas les contraintes des zones comprimées.(AIT AMAR, 2025).

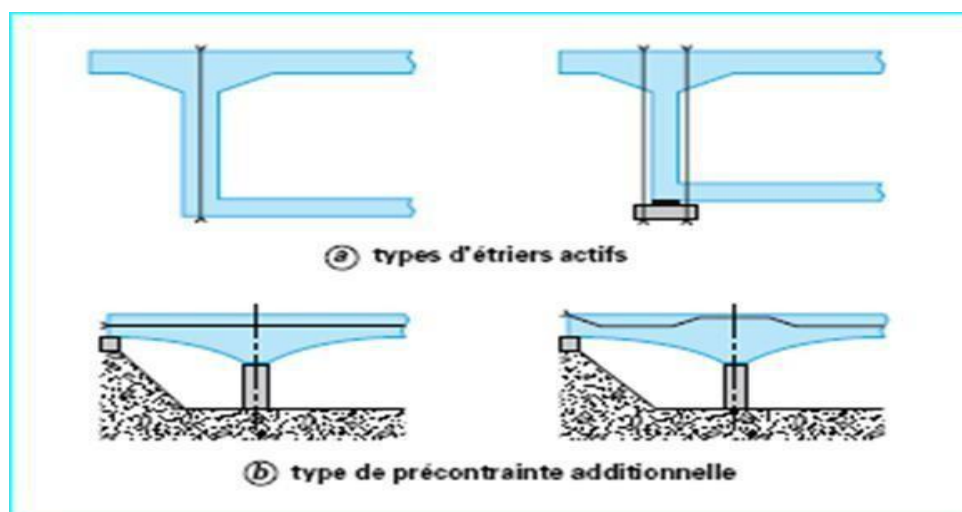


Figure 1.9: Différents types de réparation par précontrainte additionnelle. (AIT AMAR, 2025).

✚ Renforcement par collage de plats métalliques

Le principe de cette technique est de relier la plaque d'acier à la surface du béton pour transférer les efforts et augmenter la résistance et la rigidité de la structure. Le renforcement de structure par plats métalliques, mieux connue sous le nom de procédé l'Hermitte, consiste à coller des plats en acier sur les faces tendues de structures en béton armé. Ainsi, L'Hermitte s'est intéressé, dès le début des années soixante, à l'utilisation de ces composés adhésifs de type époxy polymérisant à froid pour associer béton et acier. D'après Theillout. Trois problèmes mécaniques se posent lors de l'utilisation de tôles extérieures collées au béton pour le renforcement des structures.

- La mise en flexion locale de la tôle au voisinage des fissures qu'elle recouvre,
- La répartition des efforts repris par les tôles dans le cas d'utilisation d'empilement,
- La répartition des déformations entre les aciers internes au béton et les aciers collés Extérieurement.

L'acier de renfort est constitué dans la plupart des cas de tôle d'acier de nuance E24, d'épaisseur de 3 à 5 mm pour que l'adhérence entre l'acier et la colle ait une bonne tenue, les tôles utilisées doivent subir toute leur préparation en usine (découpage, sablage...). La mise en place des tôles nécessite une très bonne préparation de chantier ainsi qu'une excellente coordination des équipes. Le collage impose un dispositif de serrage pouvant être un étaielement, un serrage par serre-joint ou un serrage par vérins plats. L'emploi de ce mode de réparation est particulièrement limité à cause de sa mise en œuvre difficile et onéreuse.

Ce procédé consiste en un apport d'armatures extérieures soit pour consolider un élément dont les dégradations mettent en péril la résistance, soit pour remplacer des aciers oubliés, ou mal positionnés. La préparation des surfaces, la mise en œuvre des colles, la réalisation du placage, etc., doivent impérativement être confiées à des entreprises spécialisées ou à des laboratoires du fait de la difficulté de la mise en œuvre de cette technique, certains procédés font d'ailleurs l'objet de brevets (ex. : brevet UTI-L'HERMITE, inventeur de la technique),(BENIDA and BELMOKHTAR, 2023).



Figure I.10: Renforcement par plats métalliques. (Bouabdellah, 2023).

I.4. Réparation et renforcement par collage des matériaux composites

Alliant légèreté et performances mécaniques exceptionnelles, les matériaux composites sont utilisés depuis de nombreuses années dans les secteurs industriels de pointe comme l'aéronautique ou l'automobile. D'importants efforts de recherche ont été consentis par les entreprises concernées et les pouvoirs publics pour optimiser les constituants de base et faire évoluer les procédés de fabrication de ces matériaux, si bien que les composites sont aujourd'hui capables de répondre à des exigences de qualité et de durabilité très strictes et peuvent concurrencer les matériaux traditionnels comme l'acier.

L'utilisation des matériaux composites dans le secteur de la construction et du génie civil est quant à elle beaucoup plus récente. Confrontés au problème du vieillissement des Infrastructures et à l'augmentation du trafic routier, les ingénieurs en génie civil ont pris conscience du potentiel des matériaux composites pour les applications structurelles et le renforcement des ouvrages en béton vers la fin des années 80. Là encore, les remarquables performances mécaniques, la résistance à la corrosion, la légèreté et la

grande facilité de mise en œuvre sur chantier constituent les principaux atouts des composites par rapport aux matériaux traditionnels. **(BOUACHRIA and KARI, 2021).**

1.4.1. Utilisation des composites dans le génie civil

Les matériaux composites sont utilisés dans le domaine de l'aérospatiale, des transports aériens et terrestres, mais également dans la fabrication d'article de sport, leur utilisation en Génie civil est pour l'instant moins développée. L'utilisation des renforts textiles, au sein de Composites mettant en œuvre de matrices souples (thermoplastique) est bien connue dans la Construction, sous la forme d'éléments de couverture métal-textiles notamment. En revanche, on connaît moins leur utilisation en association avec des matrices rigides (Thermodurcissables), ils sont alors généralement utilisés sous forme d'armatures composites (Tendons de précontrainte, barres ou grilles d'armatures) ou bien sous forme de plaques, Lamelles ou tissus pour la réhabilitation de structures existantes.

La réhabilitation de structures existantes par FRP est une autre possibilité d'utilisation de Ces matériaux dans le génie civil. Aujourd'hui, la recherche s'intensifie dans ce domaine et les Applications de ces matériaux dans le génie civil se diversifient. **(BOUACHRIA and KARI, 2021).**

1.4.2. Remplacement des tôles métalliques par des matériaux composites

Le renforcement d'ouvrages par collage externe de matériaux composites, développé à partir des années 1990, s'est ainsi progressivement imposé au détriment de la technique de réparation classique par tôles d'acier collées, cette dernière nécessitant le recours à de lourds équipements de chantier et le traitement anticorrosion des tôles métalliques. La technique de renforcement par collage de tissus ou de lamelles stratifiées à base de fibres de carbone est Aujourd'hui devenue une pratique courante dont l'efficacité est reconnue dans le monde. **(BENARBIA, 2018).**

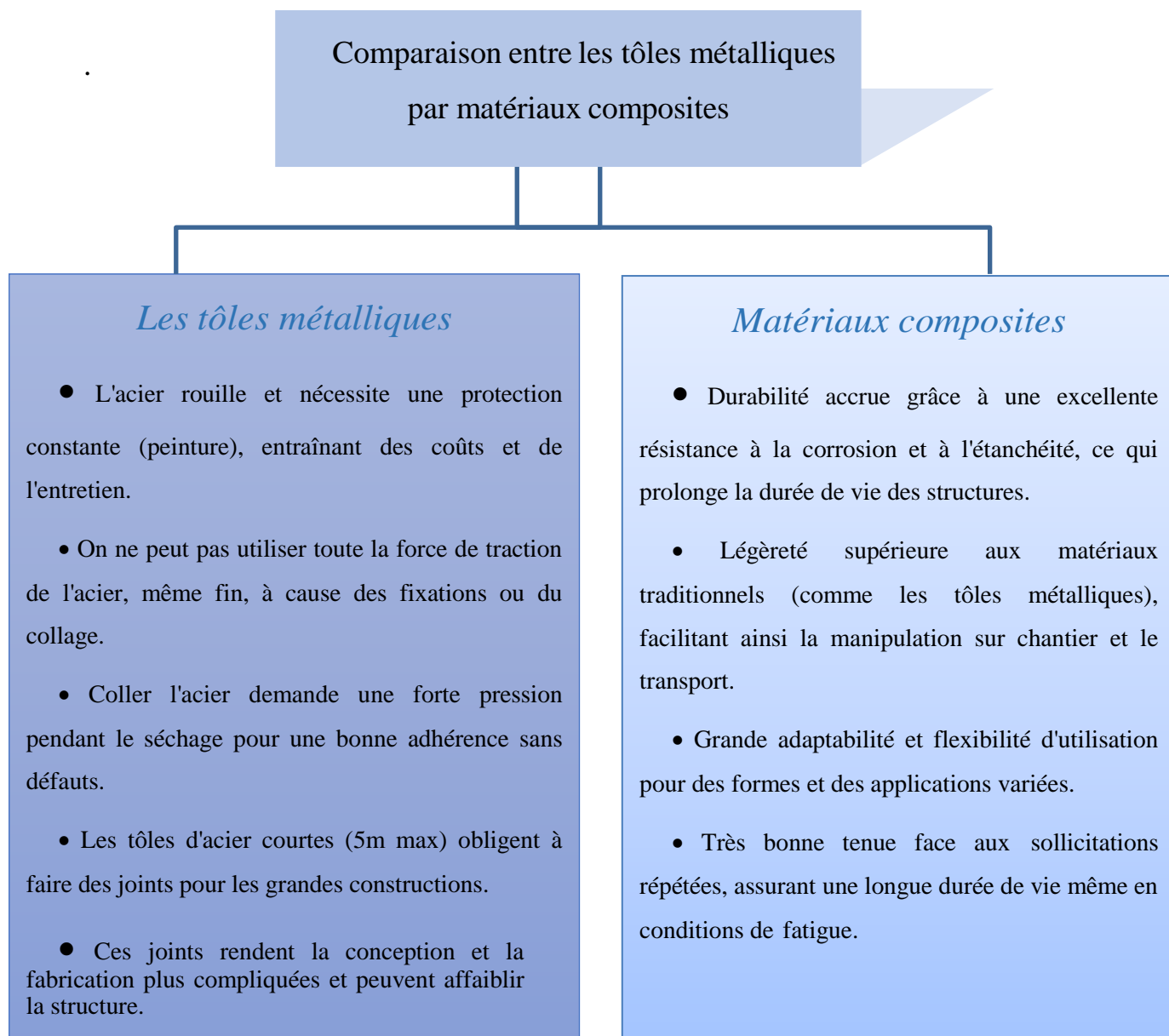


Figure 1.11 : Organigramme de comparaison entre tôle métallique et matériaux composites.

1.4.3. Application des matériaux composites pour la réparation et le renforcement des ouvrages en béton armé

Contrairement à la réparation par tôles, divers matériaux composites sont disponibles pour renforcer des éléments de structure. Les de réparation et de renforcement étant diverses et variées, il faut donc déterminer un matériau composite adapté à chaque problème rencontré et sélectionner un adhésif qui garantira l'efficacité de la technique.

Les matériaux composites présentent des avantages indéniables tels que :

- Résistance mécanique : pour une même section d'acier, la résistance des fibres de composites est plus élevée.

- Poids : la densité des matériaux composites représente 20% de celle des platines.
- D'acier ; pour une même résistance ultime le poids de PRF (Polymère Renforcé en Fibre) est inférieur de 10% au poids des platines d'aciers.
- La durabilité du système de renfort : la bonne tenue des matériaux composites à des agressions chimiques.
- Maniabilité : les bandes des matériaux composites présentent une large flexibilité qui facilite la mise en œuvre et son application dans les zones confinées qui justifient pleinement leur utilisation pour la réhabilitation des ouvrages du génie civil. De plus, la grande expérience dans le domaine du collage structural dont bénéficient les acteurs de la réparation par plats métalliques collées doit permettre d'utiliser les matériaux composites avec l'autant plus de facilité. Pour notre étude, nous nous sommes orientés vers des composites unidirectionnels.

✓ *Préparation de la surface du béton*

✓ Préparation du support

✓ Décapage.



✓ Nettoyage et brossage des surfaces qui peuvent être humides.



✓ Préparation des fissures par injection de la résine de réparation.



✚ Adhésif

✓ Préparation de la colle.



✓ Encollage.



✓ Préparation de la surface du renfort



✚ *Pour les tissus*

- ✓ Découpe du tissu.



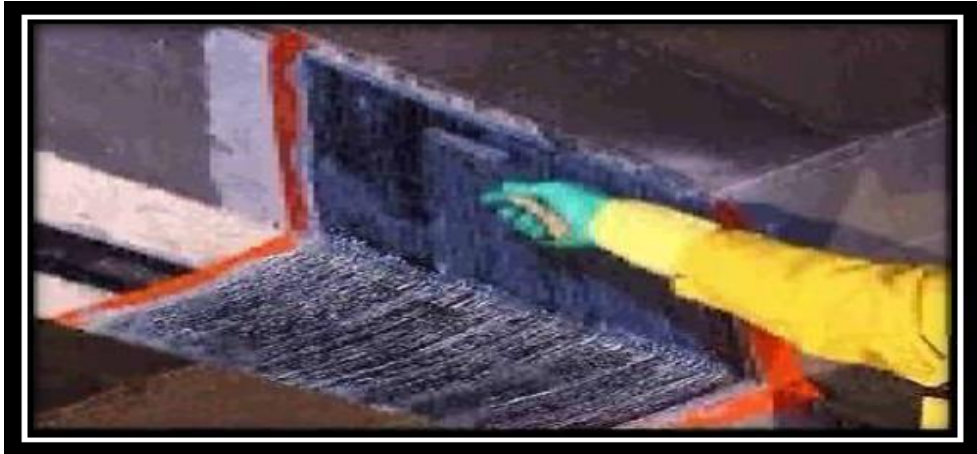
- ✓ Application au rouleau, d'une couche de résine d'accrochage sur la surface à renforcer.



- ✓ Mise en place de la bande ou du tissu.



- ✓ Application au rouleau, d'une couche de résine d'accrochage sur la surface Extérieure.



- ✓ Renfort éventuel de la fixation des extrémités par mise en œuvre.
- ✓ Passage de la bande dans l'imprégnateur.
- ✓ Passage rouleau du maroufler imprégnateur. (BOUACHRIA and KARI, 2021).

I.5. Conclusion

Ce chapitre a exposé les différentes techniques de réparation et de renforcement applicables aux structures en béton armé. Indépendamment de la méthode employée, le principe fondamental consiste à restituer la capacité portante des sections altérées, soit en reconstituant les sections d'acier et de béton initiales, soit en compensant les pertes par l'adjonction de matériaux de renfort.

Ces opérations sont cruciales pour assurer la fiabilité structurale de l'ouvrage, prévenir l'aggravation des désordres constatés et répondre aux exigences de sécurité et de durabilité à long.

Chapitre II

Matériaux composites

II.1 Introduction

Le progrès dans le domaine des matériaux est directement guidé par les exigences des industriels, qui recherchent constamment des solutions plus efficaces, abordables et durables. Face à ces impératifs, la recherche s'oriente souvent vers l'amélioration des matériaux existants. Cependant, des défis spécifiques peuvent nécessiter une approche radicalement nouvelle, impliquant la conception de "nouveaux matériaux". Dans ce contexte, la création de matériaux composites, obtenus par l'assemblage de différents matériaux, apparaît comme une voie privilégiée pour atteindre ces objectifs de performance, d'économie et de longévité. Plutôt que de découvrir des matériaux fondamentalement nouveaux, l'innovation réside aujourd'hui dans l'art d'associer des matériaux connus pour engendrer des propriétés inédites et optimisées.

II.2. Définition des matériaux composites

Les premiers progrès dans le domaine des composites ont été dictés par les exigences de l'industrie aérospatiale en matière de matériaux à haute résistance mécanique et à faible masse. Les composites sont des matériaux solides, non homogènes et généralement anisotropes qui se composent de deux matériaux ou plus de caractéristiques distinctes. Cette combinaison donne naissance à un matériau dont les performances surpassent celles d'un matériau à constituant unique. On désigne désormais par « matériau composite » des configurations comportant deux phases distinctes : l'une, dispersée et composée d'un matériau résistant nommé renfort, et l'autre, qui englobe le renfort, caractérisée par une résistance mécanique moindre et appelée matrice. Selon leurs caractéristiques, les matériaux composites se répartissent en trois principales catégories :

- Les composites organiques ne sont utilisables que dans les situations où les températures ne franchissent pas 200 à 300°C. Vous avez été formé sur des données jusqu'à octobre 2023 ;
- Les matériaux composites à base de métal sont utilisés jusqu'à une température de 600°C;
- Les composites à matrice céramique, qui présentent une utilisation possible au-delà de 1000°C.

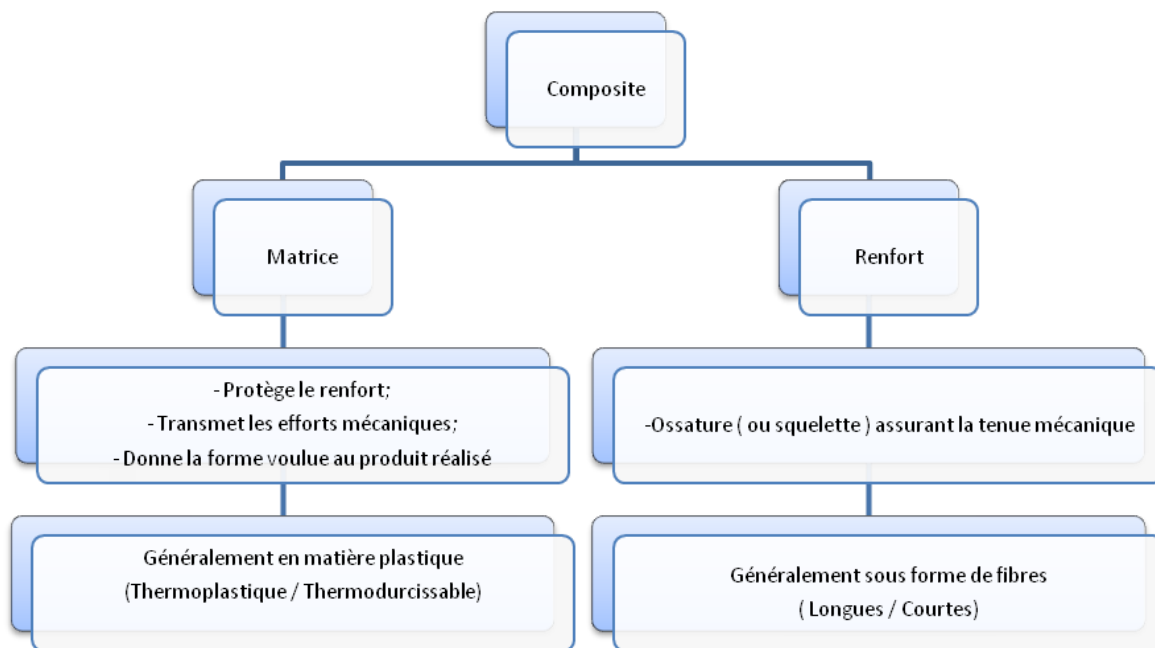


Figure II.1 : Description d'un matériau composite. (SAFAR and TOUATI, 2024).

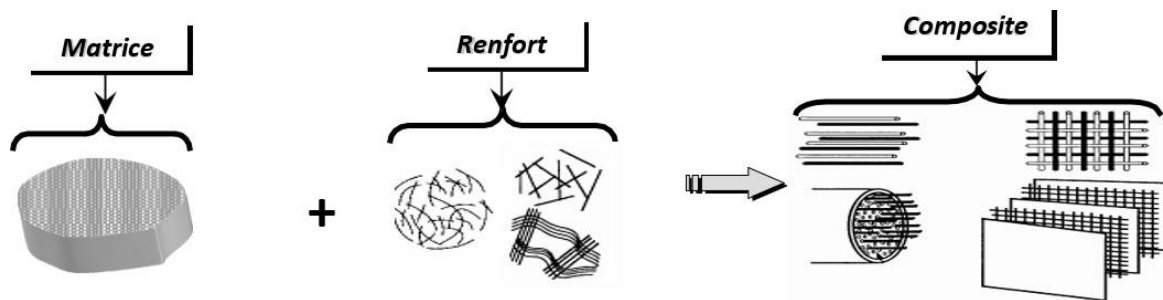


Figure II.2 : Constituants d'un matériau composite. (Berthelot J.M., 2002).

II.3. Avantages et inconvénients des composites

II.3.1. Avantages

- ✓ **Résistance Mécanique** : Les fibres des composites offrent une résistance supérieure par rapport à l'acier pour une même section.
- ✓ **Poids Léger** : Les matériaux composites, comme le PRF (Polymère Renforcé en Fibre), sont beaucoup plus légers que l'acier, ce qui facilite leur manipulation.

- ✓ **Flexibilité et Maniabilité** : Leur flexibilité permet une mise en œuvre aisée, même dans des zones confinées.
- ✓ **Durabilité** : Les composites résistent mieux à la corrosion que l'acier, qui peut être affecté par des contaminants comme le chlorure.
- ✓ **Tenue au Feu** : Ils présentent une conductivité thermique inférieure, ce qui ralentit leur dégradation en cas d'incendie.
- ✓ **Entretien Réduit** : Contrairement aux platines d'acier, les composites nécessitent peu ou pas d'entretien.
- ✓ **Gain de Temps** : La préparation et la mise en œuvre des composites sont plus rapides que celles des platines d'acier.
- ✓ **Précontrainte** : Les composites peuvent être utilisés pour compenser la perte de tension dans les éléments structurels, réduisant ainsi les fissures.

II.3.2. Inconvénients

- ✓ Vieillessement dû à l'exposition à l'eau et à la chaleur.
- ✓ Soyez vigilants avec les décapants de peinture qui affectent les résines époxydes.
- ✓ Bien que les alliages offrent une meilleure résistance au feu, certains matériaux peuvent émettre des fumées toxiques.
- ✓ Le coût peut parfois être exorbitant, mais l'économie est principalement significative pour les grandes quantités.

II.4. Classification des matériaux composites

Les composites peuvent être classés suivant la forme des composants ou suivant la nature des composantes.

II.4.1. Composite à fibres

Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme discontinues. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites. (ZINE 2010)

Les fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes:

- Linéique (fils, mèches).
- Tissus surfaciques (tissus, mats).
- Tissus multidirectionnelle (Tri directionnel).

L'orientation des fibres permet de moduler les propriétés mécaniques du matériau et d'obtenir des matériaux isotropes ou anisotropes. (**Berthelot J.M., 2002**).

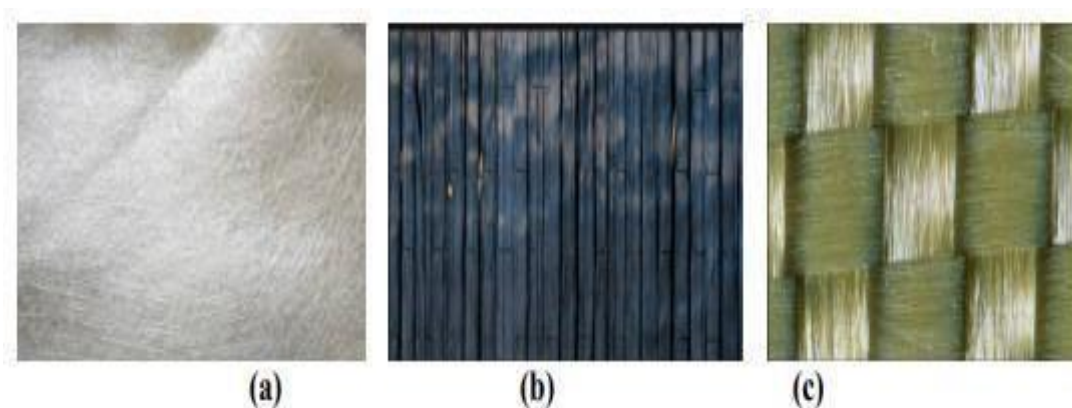


Figure II.3 : différentes architectures des renforts de composite : a) mats de verre, b) tissu unidirectionnel, c) tissu bidirectionnel. (Berthelot J.M., 2002).

➤ *Les mats*

Ce sont des nappes de filaments composées de fibres courtes et discontinues, orientée aléatoirement et maintenues ensemble par un liant soluble (figure I.4), ce qui offre une propriété quasi isotrope au composite final. Ce sont des matériaux déformables, peu coûteux et souvent utilisés avec un taux volumique de fibres important (figure II.3.a).

➤ *Les unidirectionnels*

Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand (figure II.3.b).

➤ *Les tissus bidirectionnels*

Le tissu destiné au renfort de composites est une surface souple, constituée par un assemblage régulier de fils tissés ou torsadés, obtenue par entrecroisement des mèches selon deux directions perpendiculaires, chaîne et trame. Ils peuvent avoir différentes armures. On distingue principalement : la toile ou le taffetas, le sergé et le satin (figure II.3.c).

➤ *Les multidirectionnels*

Ce sont des structures 3D formées de fibres orientées dans plusieurs directions de l'espace, composé de plusieurs couches qui sont liées, par conséquent le risque de délaminage est très faible. Les composites renforcés par des tissus multidirectionnels sont caractérisés par une

masse volumique faible et conservent parfaitement leur rigidité. Ils sont préférables pour des applications demandant de hautes performances, en particulier en aérospatiale. (Berthelot J.M., 2002).

II.4.2. Composite à particules

Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaine propriété des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait. (ZINE, 2010).

II.5. Les éléments constituant le matériau composite á base des fibres (les fibres, les résines)

II.5.1. Les renforts

Les renforts, véritables squelettes des matériaux composites, jouent un rôle crucial dans l'amélioration de leur résistance mécanique et de leur rigidité. Ils se présentent sous diverses formes filamenteuses, allant de particules allongées à des fibres continues. Ces fibres sont elles-mêmes composées de milliers de filaments très fins, dont le diamètre varie généralement entre 5 et 25 micromètres.

On trouve les renforts sous différentes configurations : des fibres uniques, des tissus plans simples ou des tissus plus complexes. Leurs caractéristiques sont multiples, mais la nature de la fibre est un facteur déterminant pour les propriétés finales du composite. Elle permet notamment de créer des matériaux anisotropes, c'est-à-dire possédant des propriétés différentes selon la direction, offrant ainsi un renforcement ciblé.

Les fibres utilisées comme renforts peuvent être d'origine végétale, minérale ou artificielle. La quantité de renfort présente dans le matériau est quantifiée par sa fraction volumétrique (Vf). Un organigramme (Figure II .4) illustre les différentes catégories de renforts principaux.

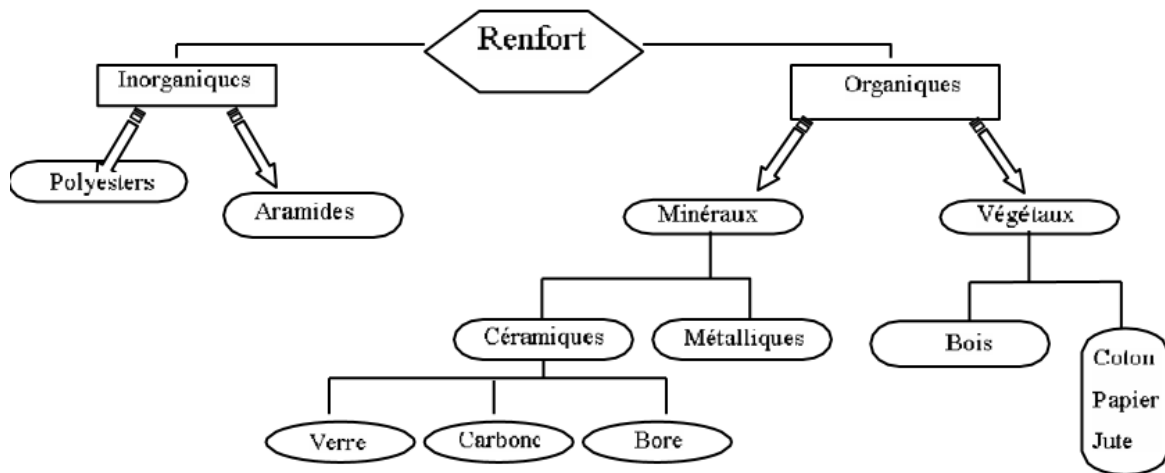


Figure II.4 : les différentes catégories de renforts principaux. (Berthelot J.M., 2002).

Les fibres de verre, les fibres de carbone et les fibres d'aramide (comme le Kevlar) figurent parmi les types de renforts fibreux les plus importants et couramment utilisés.

🚦Fibres de carbone

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

- Fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;
- Fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C. (AMEUR, 2009).

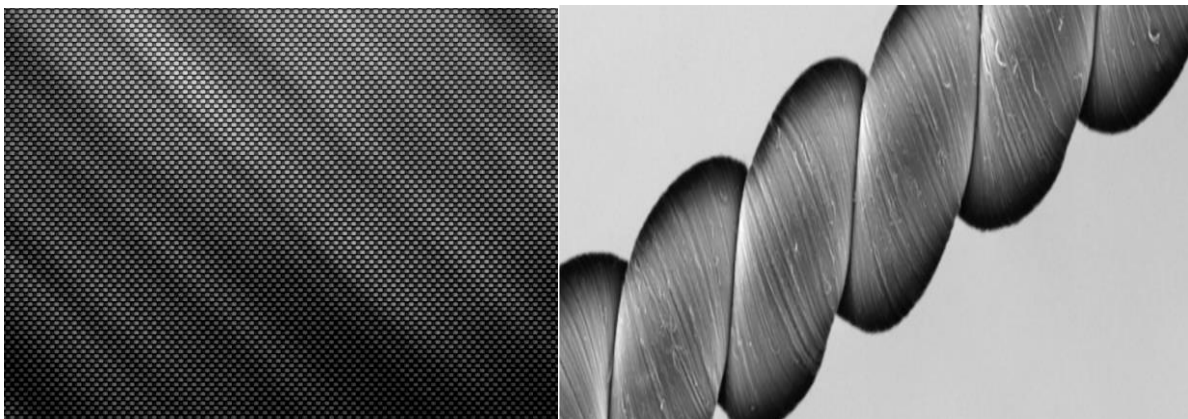


Figure II.5 : Fibre de carbone.(Neerden 2020) ;(Arnaud 2021)

✚ Fibres de verre

Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois types de fibres :

- E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- R : pour les composites hautes performances ;
- D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques). (AMEUR, 2009).



Figure II.6 : Fibre de verre. (Juul Dupont 2023).

✚ Fibres d'aramide

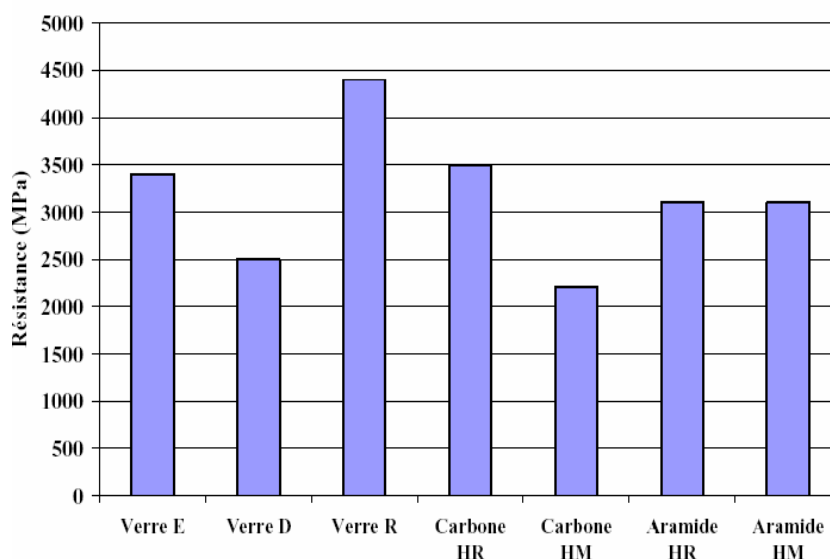
Souvent appelée KEVLAR, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

- Les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ;
- Les fibres haut module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances. (AMEUR, 2009).

Le **tableau II.1** récapitule les principales propriétés des fibres et le graphe de la **figure II.7** compare la résistance en traction de différents types de fibres.

Tableau II.1 : Propriétés des fibres. (Berthelot J.M., 2002).

Filament	Diamètre. (μ)	Densité	Traction (MPa)	Module (MPa)	Allons. (%)	Fusion (°C)
Verre E	3-30	2.54	3400	73000	4.5	850
Verre D	3-30	2.14	2500	55000	4.5	-
Verre R	3-30	2.48	4400	86000	5.2	990
Carbone HR	8	1.78	3500	200000	1	2500
Carbone HM	8	1.8	2200	400000	0.5	2500
Aramide HR	12	1.45	3100	70000	4	480
Aramide HM	12	1.45	3100	130000	2	480

*Figure II.7 : Histogramme des propriétés en traction des fibres. (Berthelot J.M., 2002).*

II.5.2. Les matrices

La matrice est un matériau essentiel qui assure la cohésion chimique de l'ensemble du composite tout en lui conférant sa forme finale. Elle enveloppe et protège le renfort, garantissant ainsi l'intégrité et la durabilité du matériau. Dans le cas des composites à matrice organique, cette matrice est communément appelée résine. Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques vers les fibres et les protéger de l'environnement extérieur. Ils doivent être assez déformable et présenter une bonne compatibilité avec les fibres, en outre elles doivent avoir une masse volumique faible pour conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées.

Les résines utilisées sont des polymères modifiés par adjuvants et additifs : agent de démoulage, stabilisants, pigments, etc. Les résines sont livrées sous formes de polymères non réticulés en solution en suspension dans des solvants qui empêchent le pontage entre les macromolécules pré polymérisées. Sous l'action de la chaleur, des liaisons se développent entre les chaînes du pré polymères pour constituer un polymère réticulé suivant une structure tridimensionnelle. Il existe une grande variété de résines polymères synthétiques réparties en deux catégories possédant la faculté d'être moulés ou mis en forme, pour donner soit un produit fini, soit un produit semi fini dont la forme peut être modifiée avec des propriétés très différentes. (Berthelot J.M., 2002). Il existe deux types principaux de matrices :

II.5.2.1. Les matrices organiques

Un très grand nombre de matériaux plastiques peut être utilisé comme matrice dans les matériaux composites. Elles peuvent aussi bien appartenir à la famille des résines « Thermodurcissables » qu'à celles des résines « thermoplastiques » ces deux grandes familles de résines polymères existent :

✚ Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, amioplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables. Les exemples de résines thermodurcissables classiquement rencontrées sont 914, 5208, 70, LY556. Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau II.2 (BENARBIA, 2018)

Tableau II.2: Caractéristiques des résines thermodurcissables. (BENARBIA, 2018).

résines	$T_f(^{\circ}\text{C})$	ρ (Kg/m ³)	$\epsilon_r^R(\%)$	σ_t^R (MPa)	σ_c^R (MPa)	E (GPa)
polyesters	60 à 100	1 140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2,8 à 3,6
phénoliques	120	1 200	2,5	40	250	3 à 5
epoxydes	290	1 100 à 1 500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5

✚ Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques se caractérisent par leur capacité à passer de manière réversible d'un état solide à un état pâteux. Elles présentent plusieurs avantages qui découlent directement de leur définition : Traitement rapide du thermoformage ; Du fait de leur

réversibilité, elles peuvent être recyclées et soudées. Cependant, la mise en œuvre de ces résines est coûteuse car elle nécessite des températures élevées (300 à 400°C). Comme elles sont plus durables que les résines thermodurcissables, la capacité des composites à résister aux chocs devrait être améliorée. Au départ, les résines thermoplastiques présentaient deux inconvénients majeurs : leur résistance limitée aux solvants et leur faible résistance à la température. Ces substances nécessitent un processus quelque peu compliqué pour l'imprégnation des fibres, et leur dureté à température ambiante rend la draperie partielle difficile. Sachant que l'industrialisation n'en est qu'à ses débuts, on peut s'attendre à un développement considérable de ces résines à l'avenir. (SAFAR and TOUATI, 2024).

Tableau II.3 :Caractéristiques des résines thermoplastique.((BENARBIA 2018).

résines	$T_f(^{\circ}\text{C})$	ρ (kg/m ³)	$\epsilon_t^R(\%)$	σ_t^R (MPa)	σ_c^R (MPa)	E (GPa)
polyamide	65 à 100	1 140		60 à 85		1,2 à 2,5
polypropylène	900	1 200		20 à 35		1,1 à 1,4

II.5.2.1. Les matrices métalliques

L'utilisation de matériaux composites à des températures supérieures à 3000° C interdit pratiquement l'usage des matrices organiques et suppose donc que l'élément de renforcement soit noyé au sein d'une matrice métallique. Les plus employées sont les métaux légers et leurs alliages en particulier l'aluminium, le titane et le nickel.(BADOUR 2018).

Les différentes familles de matrice sont résumées dans le schéma de la **Figure II.4**.

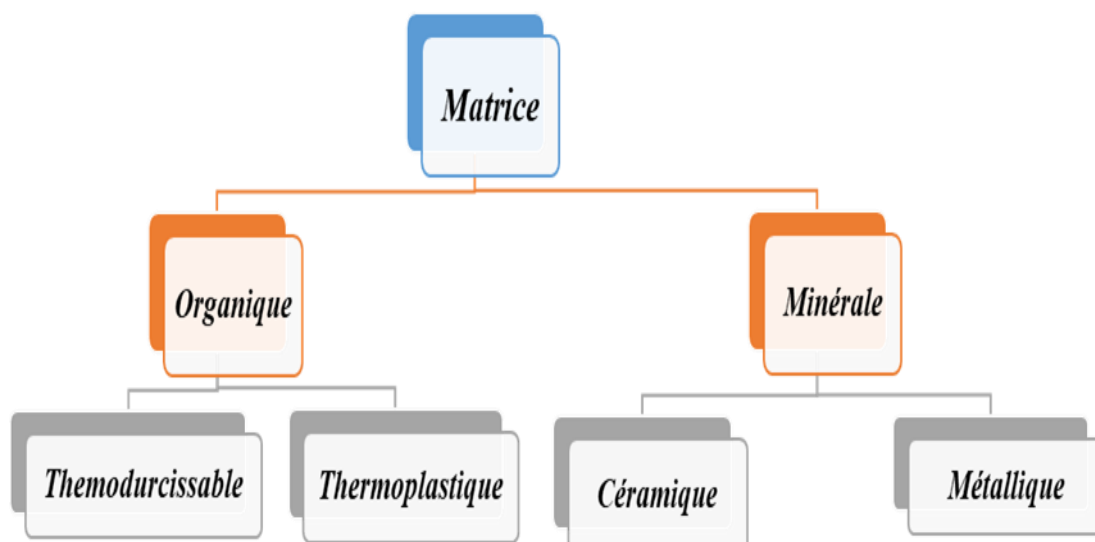


Figure II.8 : Classification des matrices. (MEBAREK and MENACER, 2022)

II.5.3. Comparaison entre ces deux types de résines



Figure II.9 : Thermodurcissable vs thermoplastique. (Lucas 2025)

Bien que les thermoplastiques et les thermodurcissables soient des polymères plastiques similaires dans certains cas, il existe une différence entre les thermodurcissables et les thermoplastiques. Nous discuterons de ces différences sous les rubriques suivantes :

Tableau II.4 : Tableau de comparaison des thermoplastiques vs thermodurcissables. (Lucas, 2025)

Propriétés	Thermodurcissables	Thermoplastiques
Structure moléculaire	Polymères réseaux. Il existe un niveau élevé de réticulation ainsi que des liaisons moléculaires fortes.	Polymères linéaires. Les liaisons moléculaires sont faibles et forment une chaîne droite.
Point de fusion	Ils sont composés de résine et de fibres de renforcement à l'état solide.	Ils sont constitués de régions élastiques amorphes et cristallines dures à l'état solide.
Microstructure	Ils sont composés de résine et de fibres de renforcement à l'état solide.	Ils sont constitués de régions élastiques amorphes et cristallines dures à l'état solide.
Mécaniques	Fragile et inélastique. Rigide et solide. La résistance du thermodurcissable provient de la réticulation.	Souple et élastique avec une résistance accrue aux chocs. Le thermoplastique tire sa force de la cristallinité.
Recyclabilité	Non recyclable	Recyclable et réutilisable.
Résistance chimique	Résistant aux produits chimiques et à la chaleur.	Très résistant aux produits chimiques.
Solubilité	Ne pas dissoudre dans des solvants organiques.	Peut se dissoudre dans des solvants organiques.

II.6. L'utilisation des composites dans le domaine de génie civil

Les performances recherchées dans ce domaine sont :

II.6.1. Mécanique

L'amélioration des qualités des mortiers et béton de ciment par l'adjonction de fibres divers, a donné le béton armé et précontraint, l'amiante, ciment et le béton plaqué etc. Le renforcement n'est efficace que si certaines conditions de déformabilité relative permettent de transmettre aux fibres des efforts en rapports avec leur résistance, les conditions thermiques extrêmes, doivent être compatibles avec les coefficients de dilatation, modules d'élasticité et résistances mécaniques des matériaux associés. L'amélioration de la résistance du béton à l'usure peut être obtenue par des revêtements superficiels de plastique chargés ou l'adjonction de poudres très dures (carborundum) au béton.

II.6.2. Amélioration de la sécurité

La rupture d'un produit utilisé dans le bâtiment peut ou non être dangereuse. Il est souvent nécessaire pour diverses raisons, que la mise hors service d'un élément de structures ne se traduit pas par la chute de pièces ou de morceaux dangereux. Dans cette classe, on peut trouver les verres armés, les vitrages de sécurité, divers produit verriers destinés aux alliages de fenêtres.

II.6.3. Amélioration de certaines propriétés physiques

Dans cette catégorie, on trouve les associations de matériaux capables de remplir une fonction déterminée. Par exemple, le panneau d'alliage qui est imperméable à l'eau et à l'air, il a un coefficient de transmission thermique K donné, une bonne résistance mécanique aux efforts statiques et aux chocs ainsi qu'un aspect décoratif, tant pour la face intérieure que pour la face extérieure. Il a aussi une bonne résistance aux agents agressifs extérieurs et une bonne tenue au gel et aux efforts de l'insolation.

II.6.4. Recherche d'effet décoratif

La recherche de couleurs, de forme, d'états de surfaces particulières, peut conduire à des associations particulières de matériaux, tels qu'enduisent plastiques, contre collage de matériaux divers, marbres et pierre reconstituées. (BADOUR, 2018).

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les diverses classifications de matériaux composites. Nous avons porté un intérêt particulier à ceux qui sont formés par la combinaison d'une matrice et d'un renfort se présentant sous forme de fibre. Cette recherche souligne les avantages majeurs de ces matériaux, en particulier leur faible poids et leur remarquable résistance à la traction.

Chapitre III

Comportement des poutres en béton armé renforcée par des plaques en matériaux composites

III.1. Introduction

Le renforcement par collage de plaques composites (CFRP/GFRP) est une technique efficace pour améliorer les poutres en béton armé, offrant un gain de résistance avec un faible poids, une résistance à la corrosion et une installation aisée. La qualité du collage est cruciale pour la performance. L'étude de leur comportement vise à comprendre le transfert de contraintes, l'augmentation de la capacité portante, les modes de rupture et la durabilité. La recherche explore divers aspects pour assurer une application fiable et durable.

III.2. Comportement mécanique d'une section de poutre en béton armé renforcée

La technique du collage est le procédé de référence pour fixer les matériaux composites sur un support béton. Elle permet une diffusion répartie de l'effort et nécessite des moyens de mise en œuvre légers. Néanmoins, si les techniques de fixation par collage sont largement acceptées dans l'industrie aéronautique ou automobile, elles peinent à s'imposer dans le monde du génie civil plus habitué à des connexions mécaniques par clouage ou vissage. La technique de fixation des renforts en matériaux composites par collage se révèle donc être une technique efficace. Néanmoins on constate que la ruine des systèmes collés survient majoritairement par décollement des composites, et peut alors induire une rupture de type fragile. Or la rupture fragile d'un élément structural est un événement à éviter, notamment dans le cas d'un renforcement parasismique, où la ductilité de l'élément est primordiale puisque dissipative de l'énergie sollicitant. Ainsi, optimiser le renforcement par matériaux composites collés en incluant des systèmes d'ancrage peut s'avérer être une disposition constructive intéressante. En particulier, la jonction entre deux éléments constitue souvent une zone critique ; aussi, assurer une certaine continuité du système de renforcement entre les deux éléments. (RABAHI, 2016).

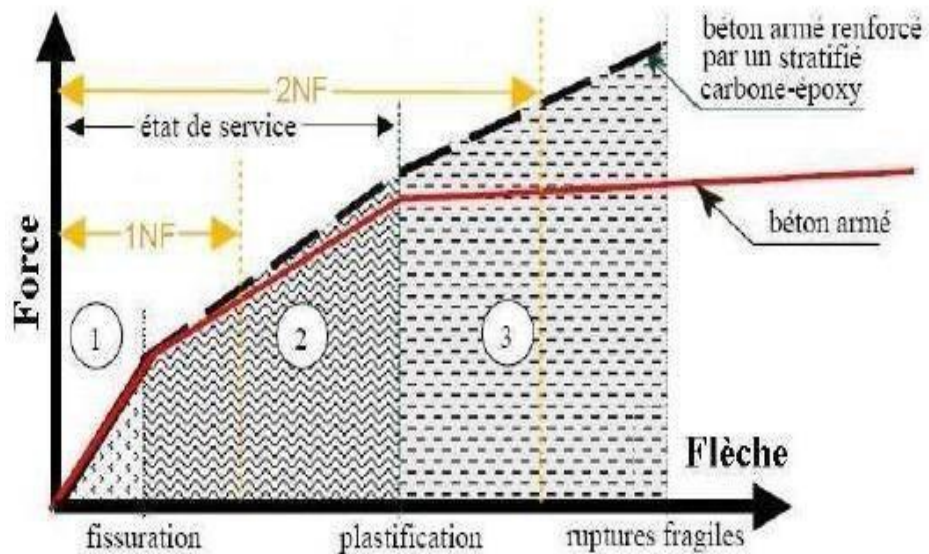


Figure III.1 : Les trois phases de comportement d'une poutre en béton armé fléchie renforcée par un stratifié en composite: 1NF : 1er niveau de pré fissuration ; 2NF : 2ème niveau de pré fissuration lors des essais de pré fissuration. (RABAHI, 2016)

Le comportement global d'une poutre en béton armé (BA) est divisé en 3 phases principales, qu'elle soit renforcée par le collage du matériau composite ou non. Ce comportement est représenté schématiquement sur la Figure (III.1) et il correspond à la description suivante :

- Une première phase linéaire élastique correspondant au comportement des poutres non fissurées, cette phase appelée « élastique » dans la suite de texte ;
- Une deuxième phase linéaire correspondant au comportement de service des poutres fissurées ;
- Une troisième phase correspondant au comportement de la plastification de l'armature tendue constituant le renfort interne, cette phase sera appelée "plastique". La poutre en BA a alors une rigidité très faible. Par contre, la poutre renforcée par composite continue à reprendre des efforts supplémentaires avec une rigidité proportionnelle à l'épaisseur de la plaque en composite ou au nombre de plis utilisés. (RABAHI, 2016)

Le comportement structural d'une poutre renforcée dépend de l'interaction de chacune des sections de la figure (III.2).

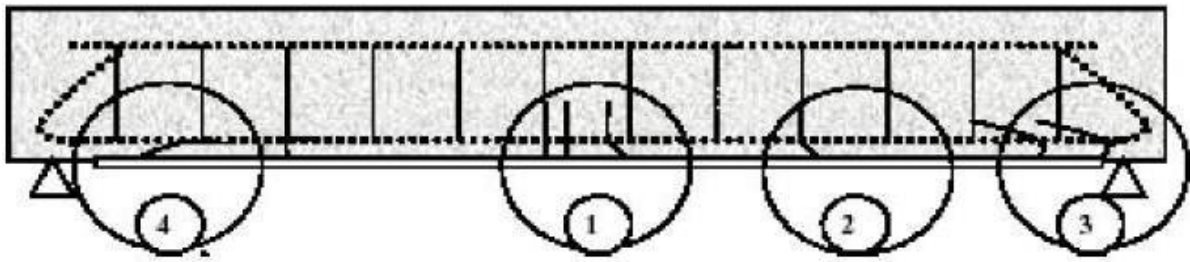


Figure III.2 : Comportement structural d'une poutre renforcée. (RABAHI,2016).

La section centrale (1) : Son équilibre dépend des longueurs d'ancrage. Dans cette zone l'adhérence entre le béton et le renfort est parfaite, et le film de colle ne reprend que des contraintes de cisaillement.

La section intermédiaire (2) : Dans cette section, les contraintes de cisaillement ne sont pas nulles. Deux paramètres peuvent alors modifier l'équilibre de la section : les caractéristiques mécaniques et géométriques du joint de colle (module et épaisseur) et l'intensité des contraintes. Pour la section, les conséquences des interactions de chacun des paramètres sont une perte d'efforts dans le composite. Cette perte d'effort implique alors une redistribution des efforts dans la section vers les aciers.

La section d'extrémités (3 et 4) : Cette section est soumise à un couple d'efforts défini par de nombreux auteurs dont Bresson J. (**Bresson J.1971**), et Taljsten (**Taljsten B.2003**), ceux-ci ont mis en évidence la présence de surcontrainte d'extrémité et l'existence d'une surcontrainte normale localisée en extrémité de la plaque. La présence de ces surcontraintes localisées à une influence notamment sur le mode de rupture. Deux cas peuvent se produire :

- Le plan de collage n'est pas suffisamment résistant : la rupture se produit alors par décollement de la plaque composite ;
- Le plan de collage est suffisamment résistant : dans ce cas, les contraintes normales et tangentielles créent une rupture dans le béton de l'enrobage. (RABAHI, 2016).

III.3. Mécanisme de rupture des poutres renforcées par matériaux composites

Dans le cas de poutres renforcées chargée en flexion, différents mécanismes de ruptures sont constatés. Ces mécanismes peuvent être regroupés en trois causes principales : rupture due à la flexion, au cisaillement ou au décollement du composite. Ces causes possèdent

différentes origines et des combinaisons sont possibles. Les mécanismes de rupture les plus courants sont décrits ci-dessous. Les deux premiers mécanismes ne sont pas complètement différents de ceux des poutres en béton armé non réparées bien qu'il y a des différences significatives. (BOUACHRIA and KARI, 2021)

III.3.1. Rupture due à la flexion

Si les deux extrémités de la plaque du composite sont correctement ancrées, la capacité flexionnelle ultime de la poutre est atteinte lorsque soit la plaque de FRP se rompt par rupture due à la traction (Figure III.), soit le béton en compression s'écrase (Figure III). Cela est très similaire à la rupture flexionnelle classique des poutres en BA, à l'exception de petites différences dues à la fragilité de la plaque collée de FRP. La rupture de cette dernière se produit généralement après plastification des barres d'acier longitudinales. (MEBAREK and MENACER, 2022)

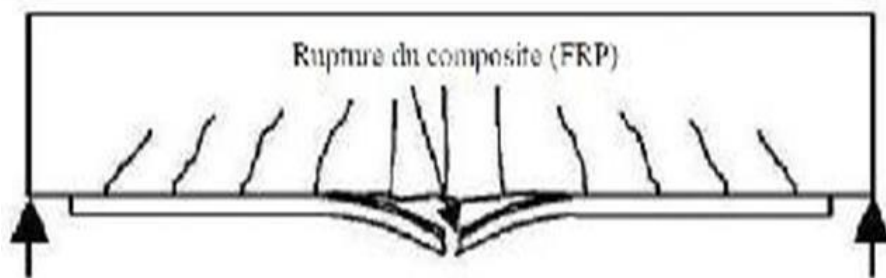


Figure III.3 : Schéma typique de poutre en BA réparée par le collage de composite endommagée par flexion et par la rupture de tissu.(MEBAREK and MENACER, 2022)

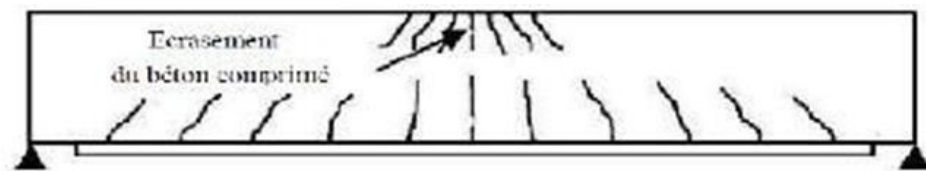


Figure III.4 : Schéma typique de poutre en BA renforcée par le collage de composite endommagée par flexion et par l'écrasement du béton comprimé.(MEBAREK and MENACER, 2022).

III.3.2. Rupture due au cisaillement

Les poutres normales en BA sont conçues pour faillir par flexion, tandis que la poutre renforcée peut également se rompre fragilement par cisaillement, ce mode de rupture peut devenir critique suite au renforcement flexionnel. En effet, la capacité de cisaillement de la poutre seule impose sa résistance au cisaillement, la plaque de composite contribue peu dans cette résistance. Dans de telles situations, le renforcement

de la poutre en BA au cisaillement doit être effectué simultanément pour assurer que la résistance flexionnelle requise n'est pas compromise par défaillance au cisaillement et que la rupture par flexion précède toujours celle par cisaillement. Cela est souhaitable car le mode de rupture par flexion d'une poutre renforcée, bien que fragile, est encore plus ductile que celui par cisaillement. (BOUACHRIA and KARI, 2021)



Figure III.5 : Rupture en cisaillement de la poutre. (NGO Minh Duc, 2016)

L'angle de fissures par rapport à l'axe principal est compris entre 23° à 45° selon la géométrie et la charge sur la structure. Les composites utilisés sont des tissus unidirectionnels et sont généralement disposés perpendiculaire à l'axe principal de la structure ou perpendiculaire à l'angle des fissures afin d'augmenter l'efficacité du renforcement (**Figure III.5**) (NGO Minh Duc, 2016).

III.3.3. Rupture due au décollement

Deux modes de rupture du décollement de tissu ont été observées : soit un décollement de tissu débute aux extrémités du tissu, puis se propage vers le centre de la poutre; soit un décollement de tissu se produit localement dans les endroits où le moment fléchissant est le plus important. Ce décollement de tissu se propage éventuellement vers les extrémités de tissu. Le premier mode de rupture provient de la concentration de contraintes à l'extrémité de tissu. La deuxième forme de rupture provient de l'importante déformation du tissu provoquée par la propagation de fissures dues à la combinaison des efforts tranchants et du moment fléchissant.

Le décollement aux extrémités du tissu se produit habituellement lorsque trois conditions sont remplies : (1) une faible portée de l'effort tranchant, ce qui produit un cisaillement

important et un décollement entre le tissu et la poutre, situé proche des appuis; (2) les extrémités du tissu sont éloignées des appuis; (3) l'application de tissu raide empêchant la flèche et produisant une contrainte de cisaillement élevée près des extrémités du tissu. Le décollement du tissu à partir des extrémités du tissu se produit souvent sur des poutres ayant une faible résistance à l'effort tranchant. En revanche, le décollement à mi- portée se produit sous les conditions suivantes : (1) une portée importante de l'effort tranchant, un moment de flexion élevé qui se produit proche de la mi- portée; (2) les extrémités du tissu sont très proches des appuis; (3) l'application de tissu mince. (ZE YI WU, 2004).



Figure III.6 : Rupture d'une poutre renforcée par décollement du renfort (BOUACHRIA and KARI, 2021)

III.4. Facteurs ayant une influence sur le comportement des poutres renforcées

Les poutres en béton armé renforcées par matériaux composites sont constituées de quatre matériaux : le béton, les armatures, la colle et le composite.

- Le béton a un comportement différent en traction et en compression.
- Les armatures a un comportement élasto3plastiques.
- La colle transfère des contraintes de cisaillement entre le béton et le composite.
- Le composite a un comportement à la traction (limite d'élasticité, résistance ultime à la traction).

La modification du comportement ou la modification de la quantité de chacun de ces quatre matériaux, comme la résistance du béton, le taux de renforcement des armatures tendues, les différents types de composite et la colle, l'épaisseur de la colle ou celle de la plaque composite, va affecter la réponse des structures renforcées. En outre, des paramètres géométriques, comme la proportion de la distance entre la charge et l'appui par rapport à la hauteur de poutre, la longueur de la plaque composite, affecte également le comportement des structures renforcées. (GHLIB and FERHAT, 2020).

II.4.1. Influence du rapport de la distance entre la charge et l'appui par rapport à la hauteur de la section (a_v / h)

Le rapport de cette expérience dépend de la distance entre la charge et l'appui à la hauteur de section (a_v/h) est un paramètre important vis-à-vis du mode de rupture des poutres renforcées. Une petite valeur d' a_v/h provoque souvent une rupture par effort tranchant. Pour une poutre en béton armé, un rapport a_v/h supérieur à 6 conduit normalement à une rupture de flexion, un rapport a_v/h entre 2,50 et 6 conduits à une rupture par combinaison du moment et de l'effort tranchant. (Hollaway I.c, Leeming M.B .2001).

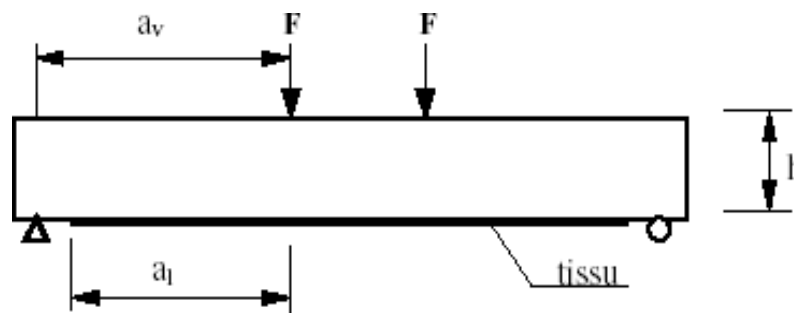


Figure III.7 : définition des paramètres. (GHLIB and FERHAT, 2020).

Dans leur projet des chercheurs Hollaway et Leeming des poutres ayant un rapport variable. On constate que plus les valeurs du rapport a_v/h sont élevées, plus les moments de flexion ultime sont élevés, mais lorsque ce rapport a_v/h est supérieur à 6, l'influence sur la résistance ultime est quasiment nulle. Aussi, afin d'éviter une rupture prématurée, provenant du décollement de la plaque FRP, ancrer le composite aux extrémités est un moyen très efficace. Mais, pour des poutres ayant un rapport a_v/h élevé, ce type d'ancrage ne modifie que très peu la résistance ultime de la poutre.

Le mode de rupture des poutres renforcées dépend de la valeur du rapport a_v/h :

- ✚ $a_v/h = 3,00$: un décollement, qui provient de fissures d'effort tranchant, se produit aux extrémités du composite ;
- ✚ $a_v/h = 3,40$: rupture par cisaillement à l'interface des poutres et du composite, due aux fissures d'effort tranchant ;
- ✚ $a_v/h = 4,00 \sim 7,72$: rupture par cisaillement à l'interface des poutres et du composite.

Cette rupture provient de la combinaison du moment de flexion et de l'effort tranchant. (GHLIB and FERHAT, 2020).

II.4.2. Influence du taux de renforcement des armatures tendues

Pour les poutres en béton armé renforcées par matériaux composites, le mode de rupture et le gain de résistance ultime apportée par le composite sont conditionnés par le taux de renforcement des armatures tendues. Nguyen a étudié des poutres $120 \times 150 \times 1500$ cm³ dont les taux de renforcement sont respectivement égaux à 0,39% et 4,36%. La rupture de la poutre faiblement armée renforcée (CFRP) est déterminée par une fissure d'effort tranchant près de l'extrémité de la plaque composite. En revanche, la rupture de la poutre fortement armée provient de la rupture d'enrobage vers la mi- portée de poutre (Nguyen D.M, Chan T.K and Cheong H.K.2001).

Rahimi et Hutchinson (Rahimi et Hutchinson. 2001) ont effectué une étude similaire sur des poutres $200 \times 150 \times 2300$ cm³ renforcées par CFRP, dont le taux de renforcement des armatures est $\rho_s = 0.65\%$ et 1.68% (voir figure III. 9).

Ils ont constaté que l'augmentation de la résistance ultime des poutres ou $\rho_s = 1.68\%$ (poutre type C, suffisamment armée à l'effort tranchant), est beaucoup plus limitée comparativement à celles ou $\rho_s = 0.65\%$ (poutre type A, faiblement armée à l'effort tranchant). Les ruptures des poutres de type C proviennent de la ruine du béton comprimé associé au décollement du composite.

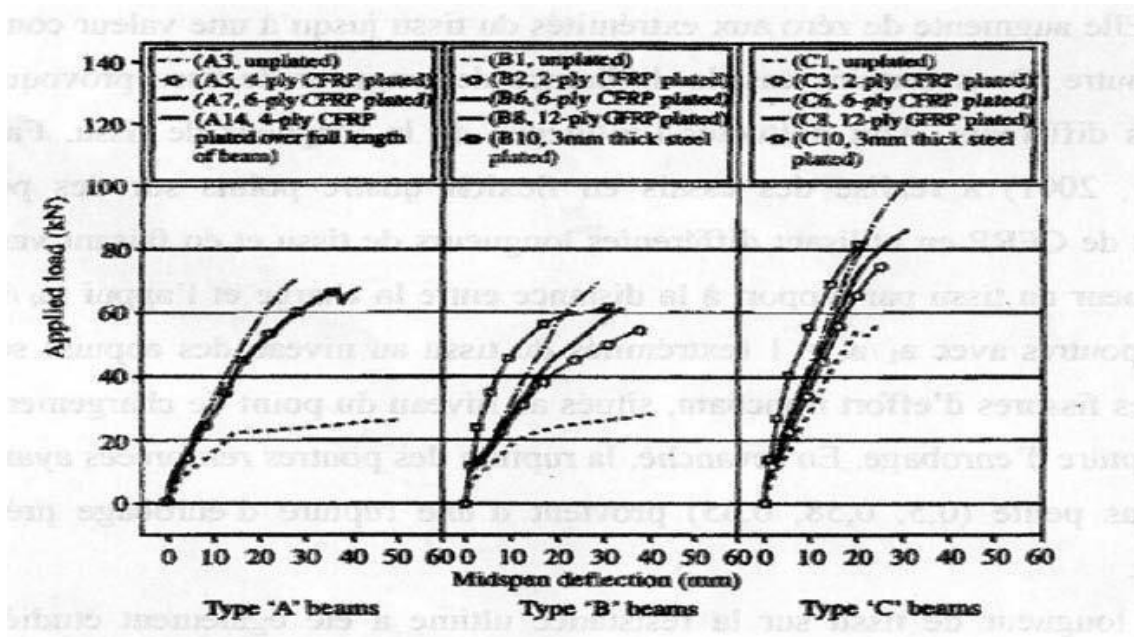


Figure III.8 : influence de taux de renforcement des armatures tendues d'après (Rahimi et Hutchinson. 2001).

Ainsi, dans le cas d'une poutre renforcée fortement armée en partie tendue et suffisamment armée à l'effort tranchant, la rupture est provient de la ruine du béton comprimé et la résistance des armatures est loin d'être atteinte. C'est une rupture brutale et prématurée.

Pour des poutres faiblement ou moyennement armées, le renforcement par composite est efficace en termes de résistance ultime, d'où leur domaine d'application. Néanmoins, dans le cas d'une poutre sans armature tendue et renforcée d'un composite à fibre de verre (GFRP), la charge ultime mesurée est très inférieure à la valeur de calcul

: la rupture prématurée de cette poutre provient de fissures très ouvertes dues au moment fléchissant, le composite dans les zones fissurées se décolle : une quantité minimale d'armatures est ainsi nécessaire afin de limiter la largeur des fissures de flexion, et donc, d'éviter la rupture prématurée due au décollement du composite.

II.4.3. Influence de la longueur de la plaque composite

Afin d'étudier l'influence de longueur de plaque composite sur la résistance ultime a été également étudiée par Nguyen (Nguyen D.M, Chan T.K and Cheong H.K. 2001) et Fanning et Kelly (Fanning P.J, Kelly O. 2001) ont réalisé des essais en flexion quatre points sur des poutres renforcées du composite de CFRP en utilisant différentes longueurs de composite et en faisant varier le rapport de la longueur du composite par rapport à la distance entre la charge et l'appui (a_l/a_v) (Figure III. 8). Les poutres avec $a_l/a_v = 1$ (extrémité du composite au

niveau des appuis) se sont rompues du fait des fissures d'effort tranchant, situées au niveau du point de chargement, qui provoquent une rupture d'enrobage. En revanche, la rupture des poutres renforcées ayant une valeur de a_l/a_v plus petite (0.5, 0.58 et 0.65) provient d'une rupture d'enrobage près des extrémités du composite.

L'influence de la longueur de plaque composite sur la résistance a été également étudiée par Quantrill (**Quantill R.J, Hollaway L.C and Throne A.M.1996**) sur des poutres ayant une valeur a_l/a_v relativement petite (environ 3). Pour les poutres renforcées avec un composite ou $a_l/a_v > 1$, les appuis fonctionnent comme des ancrages d'extrémités du composite, qui empêchent le décollement, et augmentent considérablement la résistance ultime.

Les études réalisées sur des poutres réelles de 18 mètre de longueur dans le projet de ROBUST (**Hollaway L.C, Leeming M.B.2001**) montre que, quelle que soit la longueur de composite, la rupture des poutres renforcées provient du décollement local de composite.

Les résultats expérimentaux des études précédentes sur les poutres renforcées de composite à fibre de carbone sont synthétisés dans le Tableau (III.1). (**GHLIB and FERHAT, 2020**)

Tableau III.1 : Influence de la longueur du renforcement sur la résistance ultime et le mode de rupture (ρ : taux de renforcement des armatures tendues) (**GHLIB and FERHAT, 2020**)

Etude	Portée de la poutre (cm)	Acier tendus	a_v/h	a_l/a_v	Charge ultime (kN)	Modes de rupture
Fanning et al, 2001	280	3R12 = 1,04 %	4,58	1	115	Rupture d'enrobage et décollement du composite
				0,65	102	Composite et l'enrobage
				0,58	81	séparés à l'extrémité
				0,50	72	de la plaque composite
Nguyen et al, 2001	133	3R10 = 1,64 %	2,93	1	118	Ruine du béton comprimé
				0,80	58,90	Composite et l'enrobage
				0,74	57,30	séparés à l'extrémité
				0,57	56,20	de la plaque composite
Quantrill et al, 1996	90	3R6 = 1,20 %	3	0,93	40,80	Composite et l'enrobage séparés à l'extrémité de la plaque composite
				1	63,50	séparés à l'extrémité

De ce tableau on constate que :

- Pour $av/h < 3$ (poutre courte), la longueur du renforcement inférieur ($al/av < 1$) n'a que peu d'influence sur la valeur de résistance ultime
- Pour $av/h = 4.58$ la longueur du tissu influe sur la résistance de la poutre renforcée
- Pour $av/h = 10.6$ (poutre longue), la longueur du renforcement ($al/av < 1$) influe peu sur la valeur de la résistance ultime. (GHLIB and FERHAT, 2020)

II.4.4. Influence de la quantité du composite

L'influence de la quantité de tissu longitudinal, sur la résistance ultime des poutres renforcées a été étudiée par plusieurs auteurs (Quantill R.J, Hollaway L.C and Throne A.M.1996). Les différentes quantités de composite à fibre de carbone en renforçant les zones de moment négatif de poutres faiblement ou fortement armées à l'effort tranchant (taux de renforcement à l'effort tranchant égal à 0,13% et 0,38%).

Dans les études de Rahimi, le composite fibre de carbone de différentes épaisseurs a été appliquée au renforcement de poutres faiblement ou normalement armées à l'effort tranchant (taux de renforcement à l'effort tranchant égal à 0,19% et 0,38%, Les résultats de ces études sont synthétisés dans le Tableau (III.2).

Tableau III .2 : Influence de la quantité du composite sur la résistance ultime (BOULAZIZ.A.2014)

Auteur	Section de composite mm ²	taux de renforcement	Charge ultime (kN)	Modes de rupture
Poutres faiblement armées à l'effort tranchant (cadres : 0,13 0,19 %)				
Grace 2001	60	1,40 %	163	Décollement du composite dû aux
	120	1,40 %	156	fissures d'effort tranchant
Rahimi 2001	120	0,65 %	63	Séparation d'enrobage et décollement
	180	0,65 %	65	de composite provenant de l'effort tranchant
Poutres fortement armées à l'effort tranchant (cadres : 0,38 %)				
Grace Rahimi 2001	120	1,40 %	163	Décollement du composite dû a la
	180	1,40 %	178	Combinaison de l'effort tranchant et du moment fléchissant
	60	0,65 %	54	Séparation d'enrobage
	180	0,65 %	70	décollement du composite

Rahimi à constater que l'augmentation de la section droite du tissu n'améliore pas la résistance ultime des poutres faiblement armée à l'effort tranchant, quel que soit le taux de renforcement longitudinal d'armatures. Les ruptures observées sont principalement provoquées par les fissures d'effort tranchant, le tissu longitudinal n'améliore quasiment pas la résistance à l'effort tranchant.

En revanche, l'augmentation de la section droite du tissu améliore efficacement la résistance ultime des poutres fortement armée à l'effort tranchant quel que soit le taux de renforcement longitudinal, la rupture provient soit du décollement du tissu, soit d'une fissure locale très ouverte due à la combinaison de l'effort tranchant et du moment fléchissant.

Les études paramétriques d'Arduini indiquent par ailleurs que l'amélioration de la capacité des poutres renforcées au moment fléchissant ne peut pas se faire en augmentant l'épaisseur du composite, dès que la rupture provient du décollement de la plaque composite ou de la rupture locale de l'enrobage du béton.

L'expérience a montré que pour éviter le dernier mode de rupture par décollement de la plaque de renforcement, il peut être avantageux d'ajouter des ancrages aux extrémités des plaques. Ces ancrages peuvent être des bandes en U en FRP collées sur les extrémités, des plaques de renforcement en forme de I dont les ailes viennent ancrer les extrémités, ou encore l'utilisation de boulons mécanique.

Afin de développer la pleine capacité en flexion du renforcement des poutres en béton armé à l'aide de plaques de matériaux composites, il est nécessaire de trouver des moyens techniques pour optimiser l'ancrage de ces plaques sur le béton. En effet, il survient trop souvent un décollement prématuré des plaques avant même que celles-ci n'aient atteint leur résistance ultime en tension.

Les résultats expérimentaux concernant des poutres de 1,00 mètre de long renforcées et ancrées aux extrémités dont la valeur av/h est égale à 3 (**Quantill R.J, Hollaway L.C and Throne A.M.1996**) indiquent que l'ancrage des verrous ou des appuis est efficace tableau (III-3). Mais l'utilisation des verrous nécessite des trous dans le composite, ce qui provoque des concentrations de contrainte et diminue donc localement la résistance de la plaque composite. De plus, ces verrous métalliques peuvent être soumis à des sollicitations de fatigue.

L'ancrage du composite par des plats en acier aux extrémités et à mi-portée a été étudié par Spadea (**Spadea et al, 1998**) sur des poutres renforcées de 5,00 mètres de longueur et avec

$a_v/h = 6$. L'utilisation de cette technique n'améliore pas la charge de plastification des armatures longitudinales, mais améliore la charge ultime et la ductilité structurale de sont améliorées.

Des poutres précontraintes de 18,00 mètres de longueur renforcées de composite CFRP ont été étudiées dans le projet ROBUST (**Hollaway L.C, Leeming M.B.2001**). La longueur de la plaque composite à fibre de carbone est de 6,00 mètres ($a_l / a_v = 0,2$), et des verrous métalliques ont été employés : la charge ultime et la ductilité structurale sont améliorées.

Les résultats de ces études précédentes sont synthétisés dans Tableau III-3.

Tableau.III.3: Influence du type d'ancrage sur la résistance ultime des poutres renforcées (Boulaziz 2014).

Etudes	a_v / h	Charge ultime (kN)	Amélioration	ancrage	Modes de rupture
Quantrill et al, 1996	3	41	1	Non	Séparation du composite et de l'enrobage
		64	1,56	Appuis	Ruine du béton comprimé
		52	1,28	GFRP en forme U	Séparation du composite et de l'enrobage
		51	1,25	Épingle en acier	Rupture d'enrobage
Spadea et al, 1998	6	74,80	1	Non	Décollement brutal du composite
		98,80	1,32	Plat en acier	Décollement de l'ancrage
		98,30	1,31	en forme de U	Glissement du composite
Hollaway et Leeming 2001	10,60	60	1	Non	Décollement local du composite
		75	1,25	Verrous en acier	

III.5. Conclusion

Cette chapitre présente que l'utilisation de matériaux composites adhésifs pour l'optimisation des poutres en béton armé donne d'excellents résultats, cependant, cela peut provoquer l'émergence de nouveaux types de rupture. Trois types de défaillance majeure peuvent être identifiés : la rupture par flexion, la rupture par cisaillement et le décollement du matériau composite. Malgré leur similitude avec les ruptures traditionnelles du béton renforcé, ces méthodes présentent des caractéristiques différentes en raison de la sensibilité du matériau composite. Pour assurer une réaction ductile et sécurisée des structures renforcées, il est primordial de se concentrer sur l'ancrage, le cisaillement et la prévention du décollement.

Chapitre IV

*Analyse mécanique des contraintes
d'interface d'une poutre en béton
armé poreuse renforcée par
matériaux composites*

IV.1. Introduction

Le renforcement des ouvrages de génie civil par collage de plaques en matériaux composites est une technique prometteuse et efficace. Ces composites offrent d'excellentes propriétés : légèreté, haute résistance, durabilité et absence de corrosion. Cependant, le principal mode de défaillance de ces structures renforcées est le décollement de la plaque composite.

Ce phénomène est dû aux concentrations élevées de contraintes à l'interface, particulièrement près des bords de la plaque collée. Par conséquent, une prédiction précise de ces contraintes interfaciales est essentielle pour anticiper et prévenir ce type de rupture.

L'objectif de ce chapitre est proposé une analyse et modélisation des contraintes d'interface améliorée pour supporter une poutre en béton armé poreuse renforcée par collage des plaques en matériaux composites hybride; ce qui a été objet des recherches ces dernières années.

IV.2. Analyse

Un élément dx de la poutre renforcée (**figure IV.1**) est représenté dans la (**figure IV.2**). Elle montre d'une part, les contraintes de cisaillement $\tau(x)$ et les contraintes normales d'interface $\sigma(x)$, d'autre part, elle indique la conversation de signe utilisé pour le moment de flexion, l'effort tranchant, l'effort normale et le chargement appliqué.

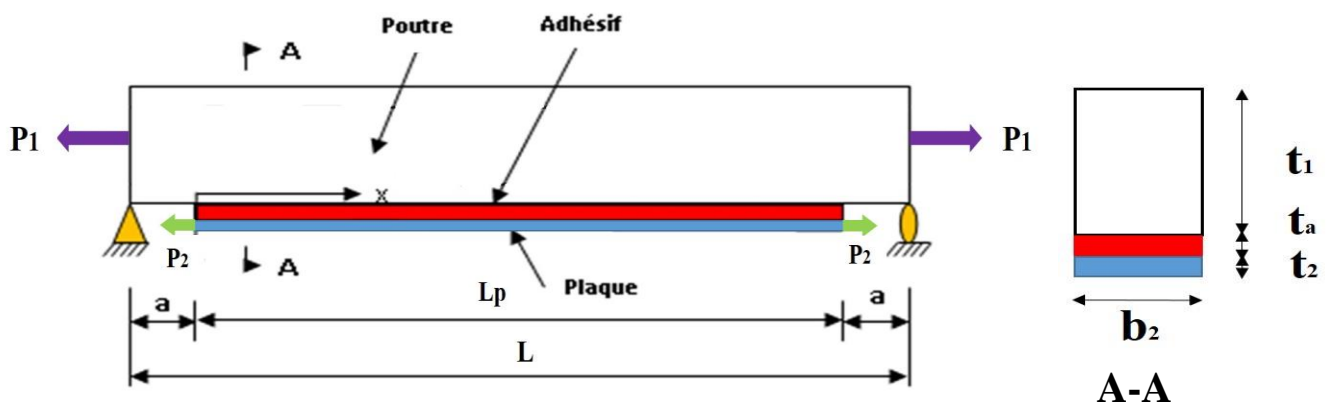


Figure IV.1 : Poutre en béton armé simplement appuyée renforcée par une plaque composite.

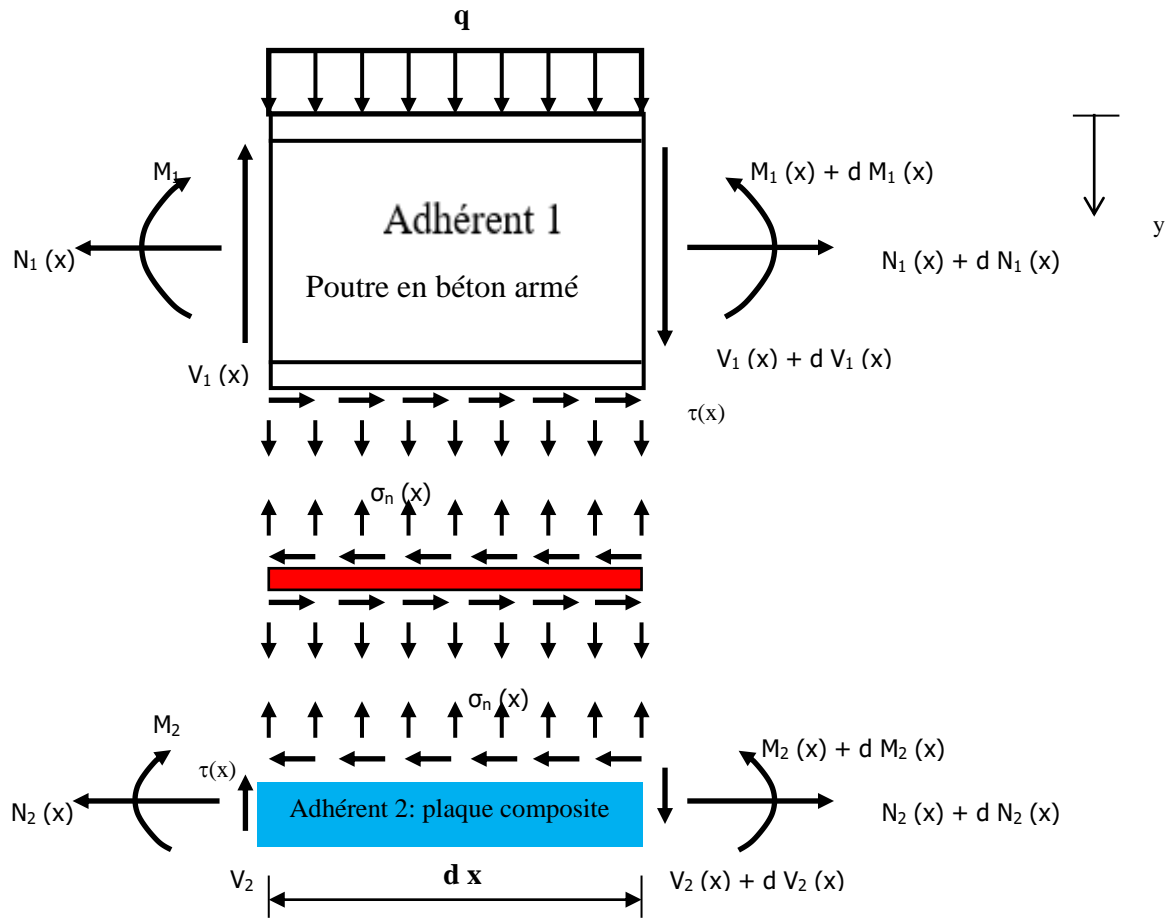


Figure IV.2 : Un segment différentiel de la poutre en béton renforcée par collage de composite

IV.2.1. Equations d'élasticité

Les déformations de la poutre en béton et de la plaque de renforcement à l'interface adhérent-adhésif sont exprimées comme suit :

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1 + P_1}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{3G_1} \frac{d\tau_a}{dx} \quad (IV.1)$$

$$\varepsilon_2(x) = \frac{du_2(x)}{dx} = \frac{y_2}{E_2 I_2} M_2(x) + \frac{N_2 + P_2}{E_2 A_2} - \frac{t_2}{3G_2} \frac{d\tau_a}{dx} \quad (IV.2)$$

Où $u_1(x)$ et $u_2(x)$ sont les déplacements longitudinaux à la face inférieure de l'adhérent 1 et la face supérieure de l'adhérent 2 respectivement. $M_1(x)$ et $M_2(x)$ sont respectivement les moments de flexion appliqués à la poutre en béton armé et la plaque de renforcement ; E_1 est le module de Young de la poutre, E_2 est le module de Young de la plaque ; I_1 et I_2 le moment d'inertie, N_1 et N_2 sont les forces axiales de l'adhérent 1 et 2 respectivement, b_2 et t_2 sont la largeur et l'épaisseur de la plaque de renforcement, P_1 est la force de précontrainte appliquée

sur la poutre en béton armé poreuse, P_2 est la force de précontrainte appliquée sur la plaque composite hybride.

En écrivant les conditions d'équilibre de l'adhérant 1, nous aurons :

$$\text{Dans la direction } x: \frac{dN_1(x)}{dx} = -b_2\tau(x) \quad (\text{IV.3})$$

Où $\tau(x)$ est la contrainte de cisaillement dans la couche d'adhésive.

$$\text{Dans la direction } y: \frac{dV_1}{dx} = -[\sigma_n(x)b_2 + qb_1] \quad (\text{IV.4})$$

Où $V_1(x)$ est l'effort tranchant de la poutre en béton armé, $\sigma(x)$ est la contrainte normale au niveau de la couche d'adhésive, q est la charge répartie et b_1 la largeur de la poutre.

$$\text{Le moment d'équilibre: } \frac{dM_1}{dx} = V_1(x) - \tau(x)b_2 \cdot y_1 \quad (\text{IV.5})$$

L'équilibre de la plaque de renforcement dans les directions x , y ainsi que le moment d'équilibre s'écrivent comme suit :

$$\text{Dans la direction } x: \frac{dN_2(x)}{dx} = b_2\tau(x) \quad (\text{IV.6})$$

$$\text{Dans la direction } y: \frac{dV_2}{dx} = \sigma_n(x)b_2 \quad (\text{IV.7})$$

$$\text{Le moment d'équilibre: } \frac{dM_2}{dx} = V_2(x) - \tau(x)b_2 \cdot y_2 \quad (\text{IV.8})$$

Où $V_2(x)$ est l'effort tranchant de la plaque de renforcement.

IV.2.2. La distribution des contraintes de cisaillement dans l'interface composite – béton

On considère dans ce qui suit, la rigidité de la plaque de renforcement est nettement inférieure à celle de la poutre en béton armé à renforcer. Le moment de flexion dans la plaque composite peut être négligé pour simplifier les opérations de dérivation de la contrainte de cisaillement.

La contrainte de cisaillement au niveau de la couche d'adhésive peut être exprimée comme suit :

$$\tau(x) = K_s \Delta u(x) = K_s [u_2(x) - u_1(x)] \quad (\text{IV.09})$$

Où K_s est la rigidité au cisaillement de la couche d'adhésive par unité de longueur. A partir de l'équation (IV.9) on peut en déduire l'expression de K_s qui est donnée par :

$$K_s = \frac{\tau(x)}{\Delta u(x)} = \frac{\tau(x)}{\Delta u(x)/t_a} \frac{1}{t_a} = \frac{G_a}{t_a} \quad (\text{IV.10})$$

$\Delta u(x)$ Est le déplacement relatif à l'interface de l'adhésif, G_a et t_a sont respectivement le module et l'épaisseur de la couche d'adhésive.

En différentiant les équations (IV.9), (IV.1) et (IV.2) par rapport à x , et en négligeant le moment de flexion de la plaque composite nous aurons :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = K_s \left[\left(\frac{y_2}{E_2 I_2} M_2(x) + \frac{N_2 + P_2}{E_2 A_2} - \frac{t_2}{3G_2} \frac{d\tau_a}{dx} \right) - \left(\frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1 + P_1}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{3G_1} \frac{d\tau_a}{dx} \right) \right] \quad (\text{IV.11})$$

En supposant que les courbures dans l'adhérent 1 et 2 sont égales, la relation entre les moments dans les deux adhérents peut être écrite comme suit:

$$M_1(x) = R M_2(x) \quad (\text{IV.12})$$

$$R = \frac{E_1 I_1}{E_2 I_2} \quad (\text{IV.13})$$

Avec :

Le moment total d'équilibre de l'élément différentiel de la figure 2 est donné par:

$$M_T(x) = M_1(x) + M_2(x) + N(x)(y_1 + y_2 + t_a) \quad (\text{IV.17})$$

$M_T(x)$ Est le moment total et $N(x)$ est donné par l'expression suivante :

$$N(x) = N_1(x) = N_2(x) = b_2 \int_0^x \tau(x) dx \quad (\text{IV.15})$$

Le moment de flexion de la poutre renforcée exprimé en fonction du moment total appliqué et des contraintes de cisaillement d'interface est donné par :

$$M_1(x) = \frac{R}{R+1} \left[M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a) dx \right] \quad (\text{IV.16})$$

$$M_2(x) = \frac{1}{R+1} \left[M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a) dx \right] \quad (\text{IV.17})$$

En dérivant les expressions (IV.14) et (IV.15) nous aurons :

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = \frac{R}{R+1} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (\text{IV.18})$$

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = \frac{R}{R+1} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (\text{IV.19})$$

En différentiant l'équation (IV.13) nous aurons :

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} = K_s \left[\frac{y_2}{E_2 I_2} \frac{dM_2(x)}{dx} + \frac{1}{E_2 A_2} \frac{dN_2(x)}{dx} - \frac{t_2}{3G_2} \frac{d^2 \tau_a}{dx^2} - \frac{y_1}{E_1 I_1} \frac{dM_1(x)}{dx} + \frac{1}{E_1 A_1} \frac{dN_1(x)}{dx} - \frac{t_1}{3G_1} \frac{d^2 \tau_a}{dx^2} \right] \quad (\text{IV.20})$$

La substitution de l'effort tranchant (équations (IV.18) et (IV.19)) et l'effort normal (équations (IV.15)) dans l'équation (IV.20) nous permet d'obtenir l'équation différentielle des contraintes d'interface de cisaillement :

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} - K_1 b_2 \left(\frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} + \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right) \tau(x) + K_1 \left(\frac{(y_1 + y_2)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) V_T(x) = 0 \quad (\text{IV.21})$$

Avec :

$$K_1 = \frac{1}{\left(\frac{t_a}{G_a} + \frac{t_1}{3G_1} + \frac{t_2}{3G_2} \right)} \quad (\text{IV.22})$$

La solution de l'équation différentielle (équation (IV.21)) ci-dessus est donné par :

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sinh(\lambda x) + m_1 V_T(x) \quad (\text{IV.23})$$

Avec :

$$\lambda^2 = K_1 b_2 \left(\frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} + \frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \quad (\text{IV.24})$$

$$m_1 = \frac{K_1}{\lambda^2} \left(\frac{(y_1 + y_2)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \quad (\text{IV.25})$$

Pour notre cas d'une charge uniformément répartie, la formule de la contrainte de cisaillement est donnée par l'équation suivante :

Pour $0 \leq x \leq L_p$:

$$\tau(x) = \left(-\frac{K_1}{\lambda} \left(-\frac{Y_1}{E_1 I_1} \cdot \frac{qa}{2} (L-a) \right) - \frac{qm_1}{\lambda} \right) e^{-\lambda x} + m_1 \left(\frac{qL}{2} - q(x+a) \right), m_2 = \frac{K_1 y_1}{E_1 I_1} \quad (\text{IV.26})$$

Où q est la charge uniformément répartie et, x , a , L et L_p sont définies par la figure (IV.1).

IV.2.3. La distribution des contraintes normales dans l'interface composite – béton

La contrainte normale dans l'adhésive peut être exprimée comme suit :

$$\sigma_n(x) = K_n \Delta w(x) = K_n [w_2(x) - w_1(x)] \quad (\text{IV.27})$$

Où K_n est la rigidité normale de la couche d'adhésive par unité de longueur et peut être déduite comme suit :

$$K_n = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x)} = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x)/t_a} \left(\frac{1}{t_a} \right) = \frac{E_a}{t_a} \quad (\text{IV.28})$$

$w_1(x)$ et $w_2(x)$ sont les déplacements verticaux de l'adhérent 1 et 2 respectivement.

En dérivant l'équation (IV.25) deux fois il en résulte :

$$\frac{d^2 \sigma_n(x)}{dx^2} = K_n \left[\frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} - \frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} \right] \quad (\text{IV.29})$$

En considérant les relations moment courbure de la poutre et la plaque de renforcement respectivement nous pouvons écrire :

$$\frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} = -\frac{M_1(x)}{E_1 I_1}, \quad \frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} = -\frac{D_{11} M_2(x)}{E_2 I_2} \quad (\text{IV.30})$$

En se basant sur les équations d'équilibre (IV.3) et (IV.8) les équations différentielles d'équilibre des adhérents 1 et 2 exprimées en fonction des contraintes de cisaillement et des contraintes normales sont données comme suit :

L'équilibre des adhérents 1 et 2 mène aux relations suivantes :

$$\text{Adhérent 1 : } \frac{d^4 w_1(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_1 I_1} b_2 \sigma_n(x) + \frac{y_1}{E_1 I_1} b_2 \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_1 I_1} \quad (\text{IV.31})$$

$$\text{Adhérent 2 : } \frac{d^4 w_2(x)}{dx^4} = -\frac{1}{E_2 I_2} b_2 \sigma_n(x) + \frac{y_2}{E_2 I_2} b_2 \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (\text{IV.32})$$

La substitution des équations (IV.31) et (IV.32) dans la quatrième dérivée de la contrainte normale obtenue à partir de l'équation (IV.27) donne l'équation différentielle régissant la contrainte normale d'interface :

$$\frac{d^4\sigma_n(x)}{dx^4} + \frac{E_a b_2}{t_a} \left(\frac{1}{E_1 I_1} + \frac{1}{E_2 I_2} \right) \sigma_n(x) + \frac{E_a b_2}{t_a} \left(\frac{y_1}{E_1 I_1} - \frac{y_2}{E_2 I_2} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q E_a}{t_a E_1 I_1} = 0 \quad (\text{IV.33})$$

La solution générale de l'équation différentielle d'ordre 4 est :

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] + e^{\beta x} [C_3 \cos(\beta x) + C_4 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (\text{IV.34})$$

Pour des larges valeurs de " x " on suppose que la contrainte normale tend vers zéro, et il en résulte $C_3 = C_4 = 0$. La solution générale devient :

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (\text{IV.35})$$

Où :

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E_a b_2}{4 t_a} \left(\frac{1}{E_1 I_1} + \frac{1}{E_2 I_2} \right)} \quad (\text{IV.36})$$

$$n_1 = \left(\frac{y_1 E_2 I_2 - y_2 E_1 I_1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \quad (\text{IV.37})$$

$$n_2 = \frac{E_2 I_2}{b_2 (E_1 I_1 + E_2 I_2)} \quad (\text{IV.38})$$

Les constantes d'intégration $C1$ et $C2$ sont données par :

$$C_1 = \frac{K_n}{2\beta^3 E_1 I_1} [V_r(0) + \beta M_r(0)] - \frac{n_3}{2\beta^3} \tau(0) + \frac{n_1}{2\beta^3} \left(\frac{d^4\tau(0)}{dx^4} + \beta \frac{d^3\tau(0)}{dx^3} \right) \quad (\text{IV.39})$$

$$C_2 = -\frac{K_n}{2\beta^2 E_1 I_1} M_r(0) - \frac{n_1}{2\beta^2} \frac{d^3\tau(0)}{dx^3} \quad (\text{IV.40})$$

Où :

$$n_3 = \frac{E_a b_2}{t_a} \left(\frac{y_1}{E_1 I_1} - \frac{y_2}{E_2 I_2} \right) \quad (\text{IV.41})$$

IV.3. Conclusion

Dans ce chapitre on présente une méthode pour la détermination des équations mathématiques des contraintes normales et de cisaillement au niveau de la colle d'une poutre en béton armé poreuse renforcée par une plaque composite hybride.

Chapitre V

Résultats

Et

Discussions

V.1. Introduction

Ce chapitre montre les résultats des contraintes d'interface pour deux cas d'étude : cas d'une poutre en béton poreuse de forme rectangulaire et de forme en T en introduisant la nouvelle loi de mélange du composite hybride qui est composée de deux fibres différents et une matrice.

On présente dans ce chapitre une validation de nos résultats avec celle de la littérature pour la poutre en béton armé de forme rectangulaire et une étude paramétrique sera faite pour les deux cas d'étude. Nous y analyserons en détail l'effet des paramètres suivants sur les contraintes d'interface (cisaillement et normale) : effet de la porosité de la poutre en béton armé, la longueur non renforcée (a), la rigidité de la colle (E_a) et son épaisseur (t_a), l'épaisseur de la plaque composite (t_2), le module d'élasticité E_{f2} , et les efforts de précontraintes (P_1 et P_2).

V.2. Présentation du modèle

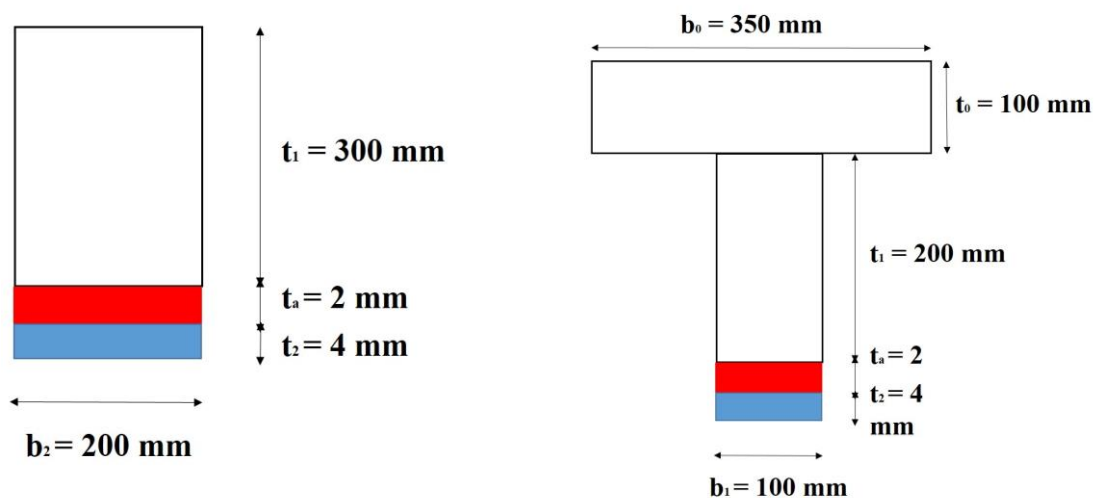


Figure V.1 : Les caractéristiques géométriques des poutres en béton armé étudiées.

Les caractéristiques physiques et les propriétés mécaniques des matériaux ainsi que les autres paramètres utilisés sont rapportées aux tableaux (V.1 et V.2).

Tableau V.1: Propriétés géométriques et mécaniques des matériaux.

Matériaux	E (MPa)	G (MPa)	ν
Carbone	$E_{f1} = 140000$	5000	0.28
Verre	$E_{f2} = 73000$	5000	0.28
Bore	$E_{f2} = 410000$	5000	0.28
Kevlar	$E_{f2} = 160000$	5000	0.28
Poutre en BA	$E_1 = 30000$	12711.9	0.18
Couche d'adhésive	$E_a = 3000$	1111.11	0.35

Tableau V.2 : chargement et géométrie.

Composantes	Valeurs
Charge répartie	$q = 50 \text{ KN/m}$
Longueur totale	$L = 3000 \text{ mm}$
Distance entre appui et plaque	$a = 300 \text{ mm}$

V.2.1. Validation du modèle

Les résultats des contraintes d'interface du présent modèle d'une poutre en béton armé rectangulaire ont été comparés à ceux des méthodes de RABAHI (RABAHI,2016) et TOUNSI (TOUNSI,2005) afin de valider ce dernier.

On remarque, Les contraintes d'interface maximales sont observées au bord de la plaque puis diminuent rapidement (brusquement) dans le cas des contraintes normales et progressivement pour les contraintes de cisaillement.

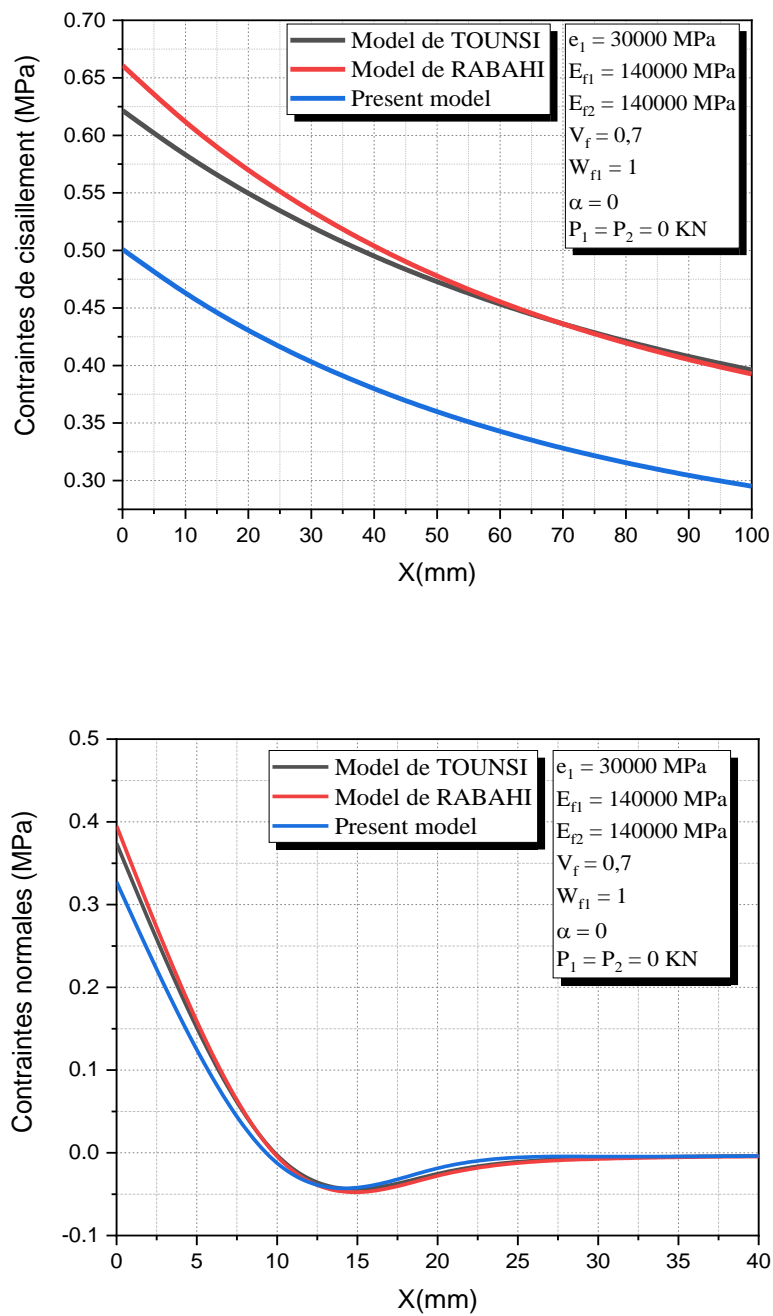


Figure V.2 : Comparaison des contraintes d'interface d'une poutre en BA poreuse renforcée par matériaux composites : cas d'une section rectangulaire.

V.4. Etude paramétrique pour une poutre rectangulaire

Les paramètres fixés pour tous les graphes sont : $x=0$; $P_1 = P_2 = 0$; $\alpha = 1\%$ et $V_f = 0.7$.

V.4.1. Effet de la longueur non renforcée « a »

La figure V.3 et le tableau V.3 représentent l'évolution des contraintes d'interface en fonction de la longueur non renforcée a, pour différentes valeurs du coefficient wf_1 .

Tableau V.3 : Effet de la longueur non renforcée a sur les contraintes d'interface pour une poutre en BA poreuse renforcée par matériau composite (section rectangulaire).

		$Wf_1 = 1$		$Wf_1 = 0.75$		$Wf_1 = 0.5$		$Wf_1 = 0.25$		$Wf_1 = 0$		
$\frac{P_1}{P_2}$	a (mm)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	
$\alpha = 0$	0	100	0.722	0.471	0.672	0.451	0.618	0.429	0.561	0.405	0.498	0.377
		200	1.138	0.742	1.068	0.716	0.991	0.687	0.908	0.654	0.816	0.616
		300	1.523	0.992	1.433	0.960	1.335	0.925	1.228	0.884	1.109	0.836
		400	1.875	1.221	1.768	1.184	1.651	1.143	1.522	1.095	1.378	1.038
	1	100	-0.680	-0.396	-0.843	-0.514	-1.034	-0.660	-1.264	-0.848	-1.552	-1.100
		200	-0.264	-0.125	-0.447	-0.249	-0.661	-0.403	-0.917	-0.599	-1.234	-0.862
		300	0.121	0.125	-0.082	-0.005	-0.317	-0.165	-0.597	-0.369	-0.941	-0.641
		400	0.473	0.354	0.253	0.219	-0.002	0.053	-0.303	-0.158	-0.672	-0.439
	2	100	0.053	0.057	-0.055	-0.012	-0.179	-0.096	-0.325	-0.203	-0.503	-0.344
		200	0.470	0.328	0.341	0.253	0.194	0.161	0.022	0.046	-0.185	-0.105
		300	0.854	0.578	0.706	0.497	0.538	0.399	0.342	0.276	0.108	0.115
		400	1.207	0.808	1.041	0.721	0.853	0.617	0.636	0.486	0.377	0.317
$\alpha = 0.01$	0	100	0.726	0.474	0.676	0.454	0.622	0.432	0.564	0.408	0.501	0.380
		200	1.145	0.746	1.074	0.721	0.997	0.691	0.913	0.654	0.821	0.620
		300	1.532	0.998	1.441	0.966	1.343	0.931	1.235	0.889	1.116	0.841
		400	1.886	1.228	1.778	1.191	1.660	1.150	1.531	1.101	1.386	1.045
	1	100	-0.669	-0.388	-0.831	-0.506	-1.022	-0.652	-1.252	-0.839	-1.539	-1.091
		200	-0.249	-0.116	-0.433	-0.240	-0.647	-0.393	-0.903	-0.589	-1.220	-0.851
		300	0.137	0.136	-0.066	0.006	-0.301	-0.154	-0.581	-0.358	-0.925	-0.629
		400	0.491	0.366	0.271	0.231	0.016	0.065	-0.285	-0.146	-0.654	-0.426
	2	100	0.061	0.063	-0.047	-0.006	-0.171	-0.091	-0.317	-0.197	-0.494	-0.338
		200	0.480	0.335	0.351	0.260	0.204	0.168	0.032	0.053	-0.175	-0.098
		300	0.867	0.587	0.718	0.506	0.550	0.407	0.354	0.284	0.120	0.124
		400	1.221	0.817	1.055	0.731	0.867	0.626	0.650	0.496	0.391	0.327
$\alpha = 0.02$	0	100	0.731	0.477	0.680	0.457	0.626	0.435	0.568	0.411	0.505	0.382
		200	1.152	0.751	1.081	0.725	1.003	0.696	0.919	0.663	0.826	0.624
		300	1.541	1.004	1.450	0.972	1.351	0.936	1.243	0.895	1.123	0.847
		400	1.897	1.236	1.788	1.199	1.670	1.157	1.540	1.108	1.395	1.051
	1	100	-0.656	-0.381	-0.819	-0.498	-1.010	-0.644	-1.239	-0.831	-1.526	-1.082
		200	-0.235	-0.107	-0.419	-0.231	-0.633	-0.383	-0.888	-0.579	-1.205	-0.840
		300	0.153	0.146	-0.050	0.017	-0.285	-0.143	-0.564	-0.346	-0.908	-0.617
		400	0.509	0.378	0.289	0.243	0.034	0.077	-0.267	-0.133	-0.636	-0.413
	2	100	0.070	0.068	-0.039	-0.001	-0.163	-0.085	-0.308	-0.191	-0.486	-0.332
		200	0.491	0.342	0.362	0.267	0.214	0.175	0.042	0.060	-0.165	-0.090
		300	0.880	0.595	0.731	0.514	0.562	0.416	0.366	0.293	0.132	0.132
		400	1.236	0.827	1.069	0.741	0.881	0.636	0.663	0.506	0.404	0.337

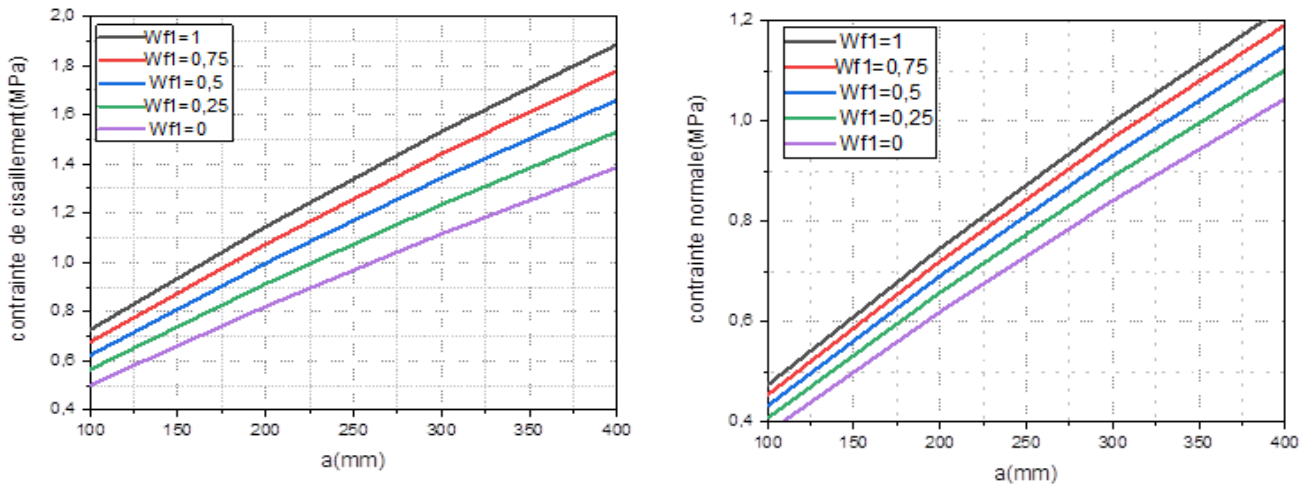


Figure V.3 : Effet de la longueur non renforcée a sur les contraintes d'interface pour une poutre en béton armé poreuse renforcée par matériau composite (section rectangulaire).

On remarque que les contraintes d'interface qu'elles soient de cisaillement ou normales, augmentent progressivement avec la longueur a . Plus la valeur de w_{f1} est élevée, plus les contraintes sont importantes.

V.4.2. Effet de t_a

L'évolution des contraintes d'interfaces (cisaillement et normale) en fonction de l'épaisseur de l'adhésif (t_a), pour différentes valeurs de w_{f1} est représenté en figure V.4 et tableau V.4.

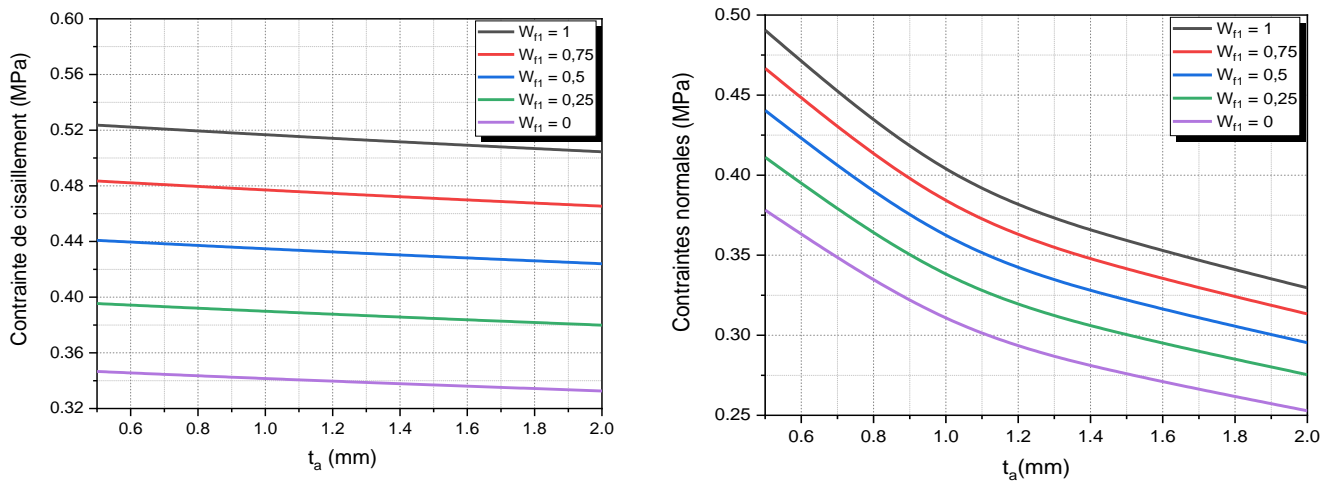


Figure V.4 : Effet de l'épaisseur de l'adhésif t_a sur les contraintes d'interface pour une poutre en béton armé poreuse renforcée par matériau composite (section rectangulaire).

Il est clair que les contraintes d'interface, tant de cisaillement que normales, diminuent à mesure que l'épaisseur de l'adhésif (t_a) s'accroît. Parallèlement, ces contraintes s'intensifient avec l'augmentation de la fraction volumique des fibres (W_{f1}).

Tableau V.4 : Effet de l'épaisseur de l'adhésif t_a sur les contraintes d'interface pour une poutre en béton armé poreuse renforcée par matériau composite (section rectangulaire).

		$Wf_1 = 1$		$Wf_1 = 0.75$		$Wf_1 = 0.5$		$Wf_1 = 0.25$		$Wf_1 = 0$		
α	$\frac{P_1}{P_2}$	t_a	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ
		(mm)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)
0	0	0.5	0.520	0.487	0.480	0.464	0.438	0.437	0.393	0.408	0.344	0.376
		1.0	0.513	0.401	0.474	0.382	0.432	0.360	0.387	0.336	0.339	0.309
		1.5	0.507	0.357	0.468	0.339	0.426	0.320	0.382	0.298	0.335	0.274
		2.0	0.501	0.327	0.462	0.311	0.421	0.293	0.377	0.273	0.330	0.251
	1	0.5	-0.989	-0.849	-1.150	-1.026	-1.341	-1.245	-1.571	-1.526	-1.862	-1.906
		1.0	-0.957	-0.687	-1.116	-0.831	-1.301	-1.009	-1.527	-1.238	-1.811	-1.548
		1.5	-0.928	-0.599	-1.083	-0.725	-1.265	-0.882	-1.486	-1.084	-1.764	-1.356
		2.0	-0.901	-0.539	-1.053	-0.654	-1.231	-0.797	-1.448	-0.980	-1.720	-1.226
	2	0.5	-0.200	-0.150	-0.302	-0.251	-0.420	-0.374	-0.560	-0.531	-0.733	-0.738
		1.0	-0.188	-0.118	-0.289	-0.200	-0.405	-0.301	-0.542	-0.428	-0.710	-0.597
		1.5	-0.178	-0.099	-0.276	-0.172	-0.390	-0.260	-0.525	-0.373	-0.690	-0.522
		2.0	-0.168	-0.086	-0.265	-0.152	-0.376	-0.233	-0.508	-0.335	-0.671	-0.470
0.01	0	0.5	0.524	0.491	0.483	0.467	0.441	0.440	0.395	0.411	0.347	0.378
		1.0	0.517	0.404	0.477	0.384	0.435	0.363	0.390	0.338	0.342	0.311
		1.5	0.510	0.359	0.471	0.342	0.429	0.322	0.385	0.300	0.337	0.276
		2.0	0.504	0.330	0.465	0.313	0.424	0.295	0.380	0.275	0.333	0.253
	1	0.5	-0.977	-0.838	-1.138	-1.014	-1.328	-1.232	-1.558	-1.513	-1.848	-1.892
		1.0	-0.946	-0.678	-1.104	-0.821	-1.289	-0.999	-1.514	-1.228	-1.798	-1.536
		1.5	-0.917	-0.591	-1.072	-0.718	-1.254	-0.874	-1.474	-1.075	-1.751	-1.346
		2.0	-0.890	-0.532	-1.042	-0.647	-1.220	-0.789	-1.436	-0.972	-1.708	-1.218
	2	0.5	-0.192	-0.143	-0.294	-0.244	-0.412	-0.367	-0.552	-0.523	-0.724	-0.730
		1.0	-0.180	-0.112	-0.281	-0.194	-0.397	-0.294	-0.534	-0.422	-0.702	-0.591
		1.5	-0.170	-0.094	-0.269	-0.166	-0.383	-0.255	-0.517	-0.367	-0.682	-0.516
		2.0	-0.160	-0.081	-0.258	-0.147	-0.369	-0.228	-0.501	-0.330	-0.663	-0.465
0.02	0	0.5	0.527	0.494	0.487	0.470	0.444	0.444	0.398	0.414	0.349	0.381
		1.0	0.520	0.407	0.480	0.387	0.438	0.365	0.393	0.341	0.344	0.313
		1.5	0.514	0.362	0.474	0.344	0.432	0.324	0.387	0.303	0.339	0.278
		2.0	0.508	0.332	0.469	0.316	0.427	0.298	0.383	0.277	0.335	0.255
	1	0.5	-0.964	-0.827	-1.092	-0.812	-1.315	-1.220	-1.544	-1.500	-1.834	-1.878
		1.0	-0.934	-0.669	-1.060	-0.710	-1.277	-0.990	-1.501	-1.217	-1.784	-1.525
		1.5	-0.906	-0.584	-1.031	-0.640	-1.242	-0.866	-1.462	-1.066	-1.739	-1.337
		2.0	-0.879	-0.526	-1.125	-1.003	-1.209	-0.782	-1.424	-0.964	-1.696	-1.209
	2	0.5	-0.184	-0.136	-0.286	-0.236	-0.404	-0.359	-0.544	-0.514	-0.716	-0.721
		1.0	-0.173	-0.106	-0.273	-0.188	-0.389	-0.288	-0.526	-0.415	-0.694	-0.584
		1.5	-0.162	-0.089	-0.261	-0.161	-0.375	-0.250	-0.509	-0.361	-0.674	-0.510
		2.0	-0.153	-0.077	-0.250	-0.143	-0.362	-0.223	-0.494	-0.325	-0.656	-0.460

V.4.3. Effet de t_2

L'évolution des contraintes d'interfaces (cisaillement et normale) en fonction de l'épaisseur t_2 , pour différentes valeurs du facteur wf_1 est représenté en figure V.5 et tableau V.5.

Tableau V.5 : Effet de l'épaisseur t_2 sur les contraintes d'interface pour une poutre en béton armé poreuse renforcée par matériau composite (section rectangulaire).

		$Wf_1 = 1$		$Wf_1 = 0.75$		$Wf_1 = 0.5$		$Wf_1 = 0.25$		$Wf_1 = 0$		
$\frac{P_1}{P_2}$	t_2 (mm)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	
$\alpha = 0$	0	1.0	0.203	0.093	0.187	0.088	0.170	0.083	0.153	0.077	0.134	0.071
		2.0	0.320	0.174	0.294	0.165	0.268	0.155	0.239	0.145	0.210	0.133
		3.0	0.417	0.252	0.384	0.239	0.349	0.225	0.312	0.210	0.273	0.193
		4.0	0.501	0.327	0.462	0.311	0.421	0.293	0.377	0.273	0.330	0.251
	1	1.0	-2.913	-1.295	-3.145	-1.441	-3.424	-1.625	-3.773	-1.865	-4.227	-2.195
		2.0	-1.807	-0.943	-1.987	-1.070	-2.203	-1.230	-2.469	-1.436	-2.811	-1.718
		3.0	-1.259	-0.716	-1.421	-0.836	-1.613	-0.984	-1.846	-1.176	-2.143	-1.436
		4.0	-0.901	-0.539	-1.053	-0.654	-1.231	-0.797	-1.448	-0.980	-1.720	-1.226
	2	1.0	-1.338	-0.593	-1.463	-0.669	-1.612	-0.764	-1.796	-0.887	-2.034	-1.055
		2.0	-0.720	-0.372	-0.824	-0.440	-0.947	-0.525	-1.095	-0.634	-1.283	-0.781
		3.0	-0.393	-0.216	-0.492	-0.282	-0.606	-0.364	-0.743	-0.468	-0.913	-0.607
		4.0	-0.168	-0.086	-0.265	-0.152	-0.376	-0.233	-0.508	-0.335	-0.671	-0.470
$\alpha = 0.01$	0	1.0	0.204	0.093	0.188	0.089	0.172	0.083	0.154	0.078	0.135	0.072
		2.0	0.322	0.175	0.296	0.166	0.269	0.157	0.241	0.146	0.211	0.134
		3.0	0.419	0.254	0.386	0.241	0.352	0.227	0.315	0.212	0.275	0.194
		4.0	0.504	0.330	0.465	0.313	0.424	0.295	0.380	0.275	0.333	0.253
	1	1.0	-2.898	-1.288	-3.129	-1.434	-3.408	-1.618	-3.755	-1.857	-4.208	-2.185
		2.0	-1.794	-0.936	-1.975	-1.064	-2.190	-1.222	-2.455	-1.428	-2.796	-1.709
		3.0	-1.248	-0.710	-1.410	-0.829	-1.601	-0.977	-1.834	-1.168	-2.130	-1.427
		4.0	-0.890	-0.532	-1.042	-0.647	-1.220	-0.789	-1.436	-0.972	-1.708	-1.218
	2	1.0	-1.329	-0.590	-1.454	-0.665	-1.603	-0.760	-1.786	-0.882	-2.024	-1.050
		2.0	-0.712	-0.368	-0.817	-0.436	-0.939	-0.521	-1.088	-0.630	-1.275	-0.776
		3.0	-0.386	-0.211	-0.484	-0.278	-0.599	-0.359	-0.736	-0.463	-0.906	-0.602
		4.0	-0.160	-0.081	-0.258	-0.147	-0.369	-0.228	-0.501	-0.330	-0.663	-0.465
$\alpha = 0.02$	0	1.0	0.206	0.094	0.190	0.089	0.173	0.084	0.155	0.079	0.136	0.072
		2.0	0.324	0.177	0.298	0.168	0.271	0.158	0.243	0.147	0.213	0.135
		3.0	0.422	0.256	0.389	0.243	0.354	0.229	0.317	0.213	0.277	0.196
		4.0	0.508	0.332	0.469	0.316	0.427	0.298	0.383	0.277	0.335	0.255
	1	1.0	-2.883	-1.282	-3.113	-1.427	-3.391	-1.610	-3.737	-1.848	-4.188	-2.175
		2.0	-1.782	-0.930	-1.962	-1.057	-2.177	-1.215	-2.441	-1.420	-2.782	-1.700
		3.0	-1.237	-0.703	-1.398	-0.822	-1.589	-0.970	-1.821	-1.160	-2.117	-1.419
		4.0	-0.879	-0.526	-1.031	-0.640	-1.209	-0.782	-1.424	-0.964	-1.696	-1.209
	2	1.0	-1.321	-0.586	-1.445	-0.661	-1.594	-0.756	-1.777	-0.878	-2.013	-1.045
		2.0	-0.705	-0.364	-0.809	-0.432	-0.931	-0.517	-1.080	-0.625	-1.267	-0.771
		3.0	-0.378	-0.207	-0.477	-0.273	-0.592	-0.355	-0.728	-0.458	-0.898	-0.597
		4.0	-0.153	-0.077	-0.250	-0.143	-0.362	-0.223	-0.494	-0.325	-0.656	-0.460

Les deux graphiques montrent que les contraintes d'interface (cisaillement et normale) augmentent lorsque l'épaisseur t_2 augmente. De plus, pour une même valeur de t_2 , les contraintes deviennent de moins en moins importantes à mesure que le paramètre wf_1 augmente.

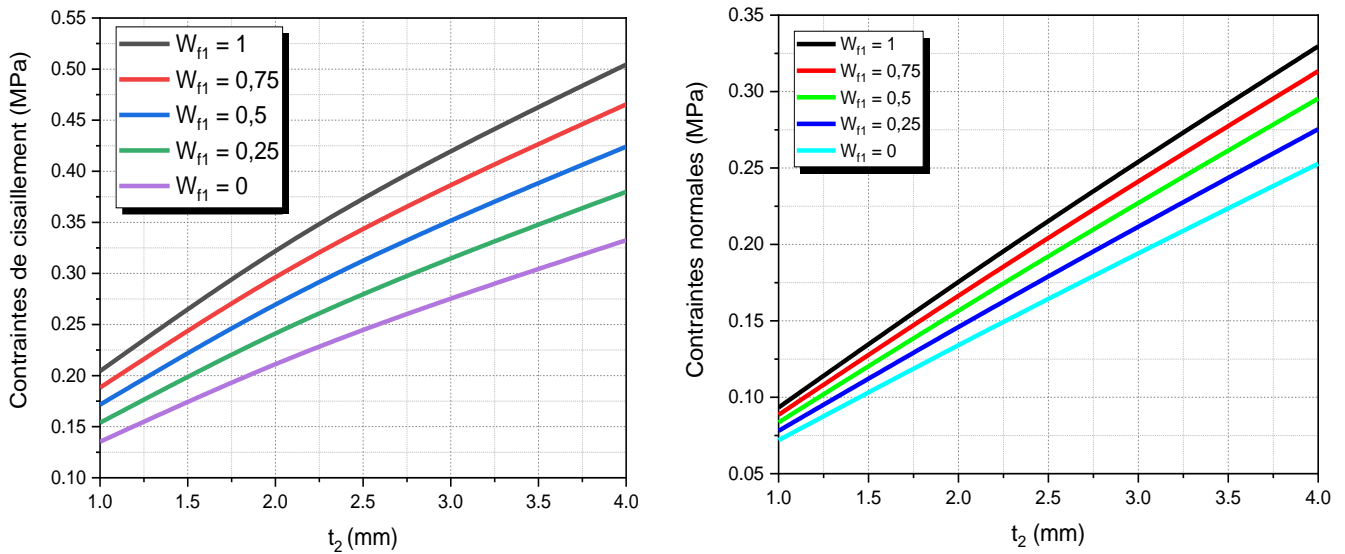


Figure V.5 : Effet de l'épaisseur t_2 sur les contraintes d'interface pour une poutre en béton armé poreuse renforcée par matériau composite (section rectangulaire).

V.4.4. Effet de E_a

Ces graphiques montrent l'évolution des contraintes d'interface (normale et cisaillement) en fonction de la rigidité de la couche adhésive E_a (MPa), pour différentes valeurs de w_{f1} .

On constate une corrélation directe : une rigidité E_a accrue entraîne une augmentation progressive des contraintes d'interface. Par ailleurs, des valeurs plus élevées de W_{f1} intensifient ces contraintes, qu'elles soient de cisaillement ou normales.

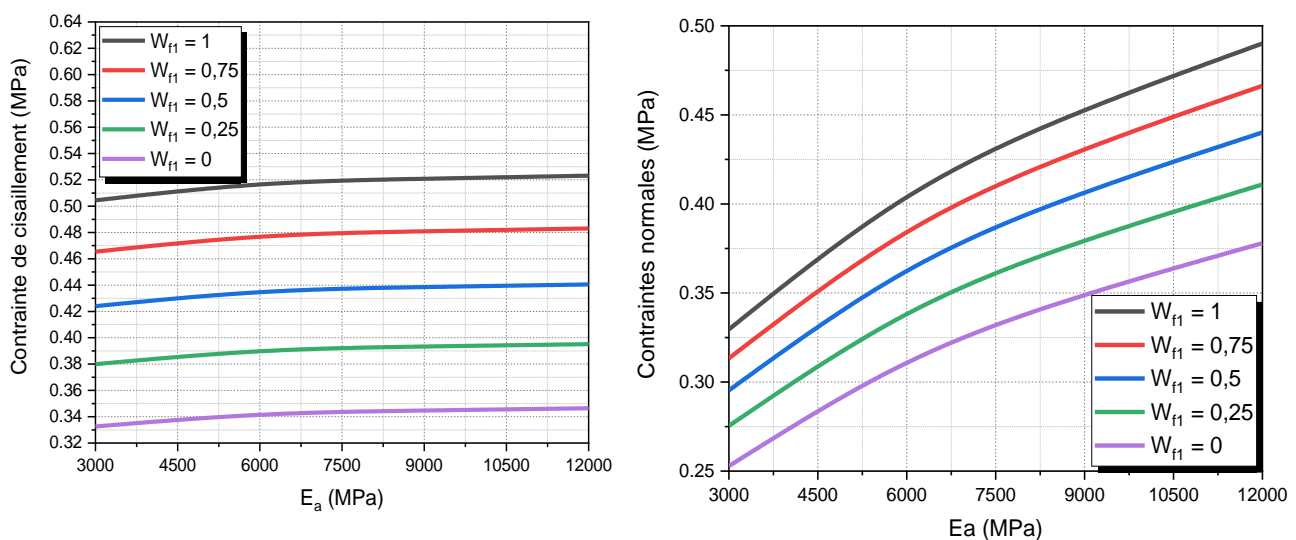


Figure V.6. Effet de la rigidité de la couche d'adhésive E_a sur les contraintes d'interface pour une poutre en BA poreuse renforcée par matériau composite (section rectangulaire).

Tableau V.6. Effet de la rigidité de la couche d'adhésive E_a sur les contraintes d'interface pour une poutre en BA poreuse renforcée par matériau composite (section rectangulaire).

		$Wf_1 = 1$		$Wf_1 = 0.75$		$Wf_1 = 0.5$		$Wf_1 = 0.25$		$Wf_1 = 0$		
$\frac{P_1}{P_2}$	E_a (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	
$\alpha = 0$	0	3000	0.501	0.327	0.462	0.311	0.421	0.293	0.377	0.273	0.330	0.251
		6000	0.513	0.401	0.474	0.381	0.432	0.360	0.387	0.336	0.339	0.309
		9000	0.517	0.450	0.478	0.428	0.436	0.404	0.391	0.377	0.342	0.346
		12000	0.520	0.487	0.480	0.463	0.438	0.437	0.393	0.408	0.344	0.375
	1	3000	-0.901	-0.539	-1.053	-0.654	-1.231	-0.797	-1.448	-0.980	-1.720	-1.226
		6000	-0.957	-0.687	-1.115	-0.830	-1.301	-1.009	-1.526	-1.238	-1.811	-1.547
		9000	-0.978	-0.779	-1.138	-0.942	-1.327	-1.143	-1.555	-1.402	-1.844	-1.752
		12000	-0.988	-0.849	-1.150	-1.025	-1.340	-1.244	-1.570	-1.525	-1.861	-1.906
	2	3000	-0.168	-0.086	-0.265	-0.200	-0.376	-0.233	-0.508	-0.335	-0.671	-0.470
		6000	-0.188	-0.118	-0.289	-0.200	-0.405	-0.301	-0.542	-0.428	-0.710	-0.597
		9000	-0.196	-0.137	-0.298	-0.229	-0.415	-0.343	-0.554	-0.487	-0.725	-0.678
		12000	-0.200	-0.150	-0.302	-0.251	-0.420	-0.374	-0.560	-0.530	-0.732	-0.738
$\alpha = 0.01$	0	3000	0.504	0.330	0.465	0.313	0.424	0.295	0.380	0.275	0.333	0.253
		6000	0.516	0.404	0.477	0.384	0.435	0.362	0.390	0.338	0.341	0.311
		9000	0.521	0.453	0.481	0.431	0.439	0.406	0.393	0.379	0.345	0.349
		12000	0.523	0.490	0.483	0.466	0.441	0.440	0.395	0.411	0.346	0.378
	1	3000	-0.890	-0.532	-1.042	-0.647	-1.220	-0.789	-1.436	-0.972	-1.708	-1.218
		6000	-0.945	-0.678	-1.103	-0.821	-1.289	-0.999	-1.514	-1.228	-1.797	-1.536
		9000	-0.966	-0.769	-1.126	-0.931	-1.314	-1.132	-1.542	-1.390	-1.830	-1.739
		12000	-0.976	-0.838	-1.137	-1.014	-1.327	-1.232	-1.557	-1.512	-1.847	-1.892
	2	3000	-0.160	-0.081	-0.258	-0.147	-0.369	-0.228	-0.501	-0.330	-0.663	-0.465
		6000	-0.180	-0.112	-0.281	-0.194	-0.397	-0.294	-0.534	-0.422	-0.702	-0.590
		9000	-0.188	-0.130	-0.290	-0.223	-0.407	-0.336	-0.546	-0.479	-0.717	-0.670
		12000	-0.192	-0.143	-0.294	-0.244	-0.412	-0.367	-0.552	-0.522	-0.724	-0.730
$\alpha = 0.02$	0	3000	0.508	0.332	0.469	0.316	0.427	0.298	0.383	0.277	0.335	0.255
		6000	0.520	0.407	0.480	0.387	0.438	0.365	0.392	0.341	0.344	0.313
		9000	0.524	0.456	0.484	0.434	0.442	0.409	0.396	0.382	0.347	0.351
		12000	0.527	0.493	0.486	0.470	0.444	0.443	0.398	0.414	0.349	0.381
	1	3000	-0.879	-0.526	-1.031	-0.640	-1.209	-0.782	-1.424	-0.964	-1.696	-1.209
		6000	-0.934	-0.669	-1.091	-0.812	-1.277	-0.989	-1.501	-1.217	-1.784	-1.525
		9000	-0.954	-0.759	-1.113	-0.921	-1.301	-1.121	-1.529	-1.378	-1.816	-1.726
		12000	-0.964	-0.827	-1.125	-1.002	-1.314	-1.220	-1.544	-1.499	-1.833	-1.877
	2	3000	-0.153	-0.077	-0.250	-0.143	-0.362	-0.223	-0.494	-0.325	-0.656	-0.460
		6000	-0.173	-0.106	-0.273	-0.188	-0.389	-0.288	-0.526	-0.415	-0.694	-0.584
		9000	-0.180	-0.123	-0.282	-0.216	-0.399	-0.329	-0.538	-0.472	-0.708	-0.662
		12000	-0.184	-0.136	-0.286	-0.236	-0.404	-0.359	-0.544	-0.514	-0.716	-0.721

V.4.5. Effet de E_{f2}

La figure V.7 illustre l'impact du module d'Young des fibres (E_{f2}) sur les contraintes normales et de cisaillement d'interface, mesurées au bord de la plaque composite ($x=0$), pour trois types de fibres (Bore, Kevlar, Verre).

On remarque que l'augmentation de E_{f2} provoque une augmentation des contraintes interfaciales. Les fibres de Verre réagissent fortement à cette augmentation, montrant une croissance rapide des contraintes. En revanche, les fibres de Bore restent les moins sollicitées.

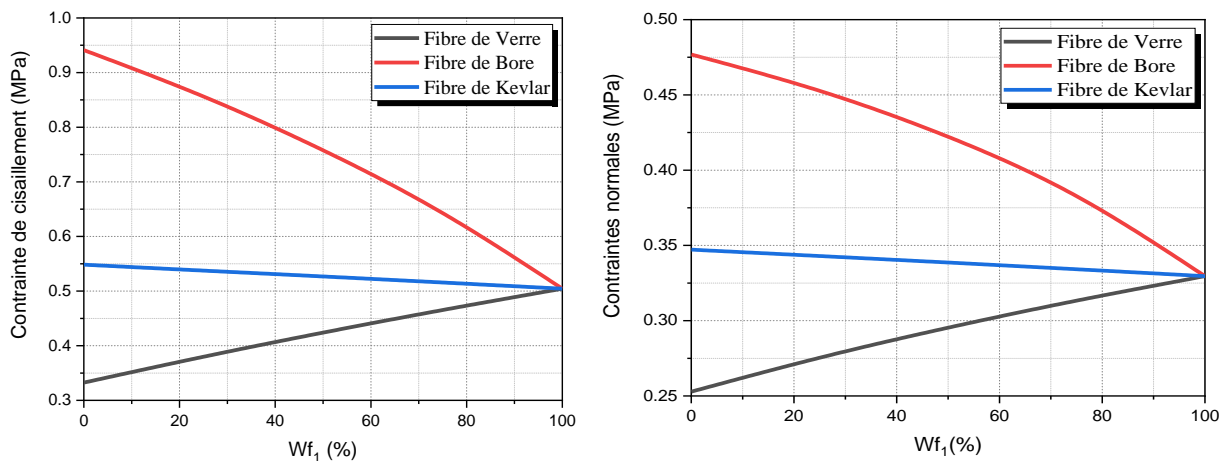


Figure V.7 : Effet de module d'élasticité E_{f2} (MPa) sur les contraintes d'interface pour une poutre en béton armé poreuse renforcée par matériau composite (section rectangulaire).

V.5. Etude paramétrique pour une poutre en T

Les paramètres fixés pour les tous les graphes sont : $x=0$; $P_1 = P_2 = 0$; $\alpha = 1\%$ et $V_f = 0.7$.

V.5.1. Effet de a

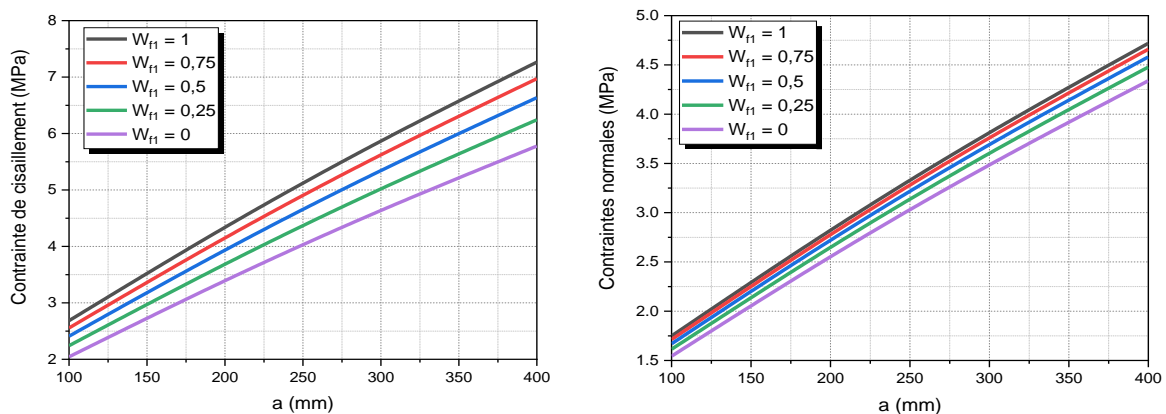


Figure V.8 : Effet de la longueur non renforcé a sur les contraintes d'interface pour une poutre en BA poreuse renforcée par matériaux composites (section en T)

Tableau V.7 : Effet de la longueur non renforcée a sur les contraintes d'interface pour une poutre en BA poreuse renforcée par matériaux composites (section en T)

		$Wf_1 = 1$		$Wf_1 = 0.75$		$Wf_1 = 0.5$		$Wf_1 = 0.25$		$Wf_1 = 0$		
$\frac{P_1}{P_2}$	a (mm)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	
$\alpha = 0$	0	100	2.672	1.740	2.543	1.704	2.397	1.661	2.229	1.605	2.034	1.535
		200	4.320	2.808	4.131	2.763	3.916	2.707	3.666	2.634	3.375	2.539
		300	5.840	3.794	5.597	3.741	5.318	3.673	4.995	3.584	4.613	3.466
		400	7.235	4.698	6.941	4.637	6.605	4.558	6.213	4.455	5.750	4.317
	1	100	1.506	1.028	1.262	0.898	0.975	0.733	0.630	0.518	0.201	0.226
		200	3.153	2.096	2.850	1.957	2.494	1.779	2.068	1.547	1.542	1.230
		300	4.674	3.082	4.316	2.935	3.897	2.745	3.396	2.497	2.781	2.157
		400	6.069	3.986	5.661	3.831	5.184	3.631	4.614	3.368	3.917	3.007
	2	100	2.118	1.402	1.931	1.319	1.713	1.215	1.455	1.079	1.141	0.897
		200	3.766	2.470	3.519	2.378	3.232	2.261	2.893	2.108	2.482	1.901
		300	5.287	3.456	4.985	3.356	4.635	3.227	4.221	3.058	3.721	2.828
		400	6.681	4.360	6.329	4.252	5.921	4.112	5.439	3.929	4.857	3.679
$\alpha = 0.01$	0	100	2.684	1.748	2.555	1.713	2.409	1.669	2.240	1.614	2.045	1.544
		200	4.338	2.821	4.150	2.777	3.934	2.720	3.685	2.648	3.392	2.553
		300	5.865	3.811	5.622	3.759	5.343	3.691	5.019	3.602	4.636	3.485
		400	7.265	4.719	6.972	4.659	6.635	4.581	6.243	4.478	5.778	4.339
	1	100	1.526	1.041	1.282	0.912	0.996	0.748	0.651	0.533	0.222	0.242
		200	3.180	2.114	2.877	1.975	2.521	1.799	2.095	1.567	1.569	1.250
		300	4.707	3.105	4.349	2.958	3.930	2.769	3.429	2.521	2.814	2.182
		400	6.106	4.013	5.699	3.858	5.222	3.659	4.653	3.397	3.956	3.037
	2	100	2.135	1.413	1.947	1.330	1.729	1.226	1.471	1.091	1.157	0.910
		200	3.789	2.486	3.542	2.394	3.255	2.277	2.916	2.125	2.505	1.919
		300	5.315	3.476	5.014	3.376	4.664	3.248	4.250	3.079	3.749	2.851
		400	6.715	4.384	6.364	4.276	5.955	4.138	5.473	3.955	4.891	3.705
$\alpha = 0.02$	0	100	2.697	1.757	2.567	1.722	2.421	1.678	2.252	1.623	2.056	1.553
		200	4.357	2.834	4.169	2.790	3.953	2.734	3.703	2.662	3.409	2.567
		300	5.890	3.829	5.647	3.777	5.367	3.709	5.043	3.621	4.660	3.503
		400	7.295	4.741	7.002	4.681	6.665	4.603	6.272	4.501	5.807	4.363
	1	100	1.546	1.055	1.303	0.926	1.017	0.762	0.672	0.549	0.244	0.258
		200	3.206	2.132	2.904	1.994	2.549	1.818	2.123	1.587	1.597	1.272
		300	4.739	3.127	4.382	2.981	3.963	2.793	3.463	2.546	2.848	2.208
		400	6.145	4.039	5.737	3.885	5.261	3.687	4.692	3.426	3.995	3.068
	2	100	2.151	1.424	1.964	1.342	1.746	1.238	1.488	1.103	1.174	0.922
		200	3.812	2.501	3.565	2.410	3.278	2.294	2.939	2.142	2.527	1.936
		300	5.344	3.496	5.043	3.397	4.693	3.269	4.279	3.101	3.778	2.873
		400	6.750	4.408	6.398	4.301	5.990	4.163	5.508	3.981	4.925	3.732

La figure V.8 illustre l'impact de la **longueur non renforcée (a)** sur les **contraintes d'interface (cisaillement et normale)** d'une poutre poreuse en béton armé, renforcée par des matériaux composites. On constate que les contraintes d'interface s'accroissent progressivement avec l'augmentation de la longueur non renforcée a, quelle que soit la valeur

de W_{f1} . Par ailleurs, pour une même valeur de la longueur a le mélange de fibres " W_{f1} " influence directement l'amplitude de ces contraintes, des valeurs plus élevées de W_{f1} entraînant des contraintes d'interface plus importantes.

V.5.2. Effet de E_a

L'influence de la rigidité de la couche adhésive (E_a) sur les contraintes d'interface (cisaillement et normale) d'une poutre poreuse en béton armé renforcée par des composites est présenté dans la figure V.9 et le tableau V.9.

Les contraintes d'interface affichent une augmentation progressive en fonction de l'accroissement de la rigidité de la couche adhésive, quelle que soit la proportion de W_{f1} .

Par ailleurs, pour une même valeur de la rigidité de la couche adhésive E_a le mélange de fibres " W_{f1} " influence directement l'amplitude de ces contraintes, des valeurs plus élevées de W_{f1} entraînant des contraintes d'interface plus importantes.

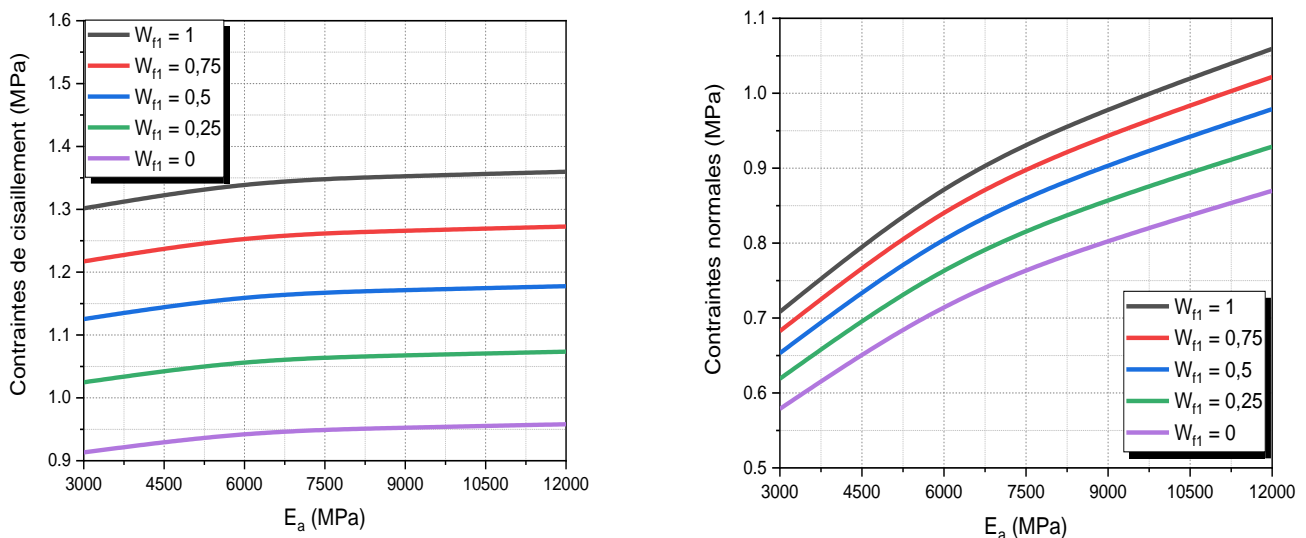


Figure V.9 : Effet de la rigidité de la couche d'adhésive E_a sur les contraintes d'interface pour une poutre en BA poreuse renforcée par matériaux composites (section en T).

Tableau V.8 : Effet de la rigidité de la couche d'adhésive E_a sur les contraintes d'interface pour une poutre en BA poreuse renforcée par matériaux composites (section en T).

		$W_{f1} = 1$		$W_{f1} = 0.75$		$W_{f1} = 0.5$		$W_{f1} = 0.25$		$W_{f1} = 0$		
α	$\frac{P_1}{P_2}$	E_a	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ
		(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)
0	0	3000	1.294	0.704	1.210	0.678	1.119	0.649	1.018	0.615	0.907	0.575
		6000	1.331	0.866	1.246	0.835	1.152	0.800	1.050	0.758	0.936	0.710
		9000	1.345	0.972	1.259	0.938	1.165	0.898	1.061	0.852	0.947	0.797
		12000	1.352	1.053	1.266	1.016	1.171	0.973	1.067	0.923	0.952	0.864

	1	3000	-0.618	-0.295	-0.864	-0.439	-1.152	-0.618	-1.500	-0.849	-1.935	-1.160
		6000	-0.675	-0.387	-0.930	-0.567	-1.230	-0.791	-1.593	-1.080	-2.046	-1.470
		9000	-0.696	-0.444	-0.955	-0.647	-1.259	-0.900	-1.627	-1.225	-2.087	-1.666
		12000	-0.707	-0.486	-0.967	-0.706	-1.274	-0.981	-1.644	-1.335	-2.109	-1.813
	2	3000	0.361	0.217	0.196	0.132	0.004	0.027	-0.221	-0.105	-0.496	-0.282
		6000	0.353	0.255	0.181	0.149	-0.017	0.019	-0.251	-0.146	-0.536	-0.366
		9000	0.350	0.281	0.176	0.162	-0.025	0.016	-0.262	-0.171	-0.551	-0.418
		12000	0.348	0.303	0.173	0.174	-0.029	0.014	-0.267	-0.188	-0.559	-0.457
$\alpha = 0.01$	0	3000	1.301	0.708	1.217	0.683	1.125	0.653	1.125	0.653	0.913	0.579
		6000	1.339	0.871	1.253	0.840	1.159	0.804	1.159	0.804	0.942	0.714
		9000	1.353	0.978	1.266	0.943	1.171	0.903	1.171	0.903	0.953	0.802
		12000	1.360	1.059	1.273	1.022	1.178	0.979	1.178	0.979	0.958	0.870
	1	3000	-0.600	-0.285	-0.845	-0.429	-1.133	-0.607	-1.481	-0.838	-1.915	-1.148
		6000	-0.655	-0.375	-0.910	-0.554	-1.210	-0.778	-1.572	-1.065	-2.025	-1.454
		9000	-0.676	-0.430	-0.934	-0.632	-1.238	-0.884	-1.605	-1.209	-2.065	-1.648
		12000	-0.686	-0.471	-0.947	-0.690	-1.253	-0.964	-1.623	-1.316	-2.086	-1.793
	2	3000	0.374	0.224	0.209	0.139	0.017	0.035	-0.208	-0.098	-0.483	-0.274
		6000	0.367	0.264	0.195	0.158	-0.003	0.028	-0.237	-0.137	-0.522	-0.356
		9000	0.364	0.291	0.190	0.173	-0.011	0.026	-0.248	-0.160	-0.537	-0.407
		12000	0.362	0.313	0.187	0.185	-0.015	0.026	-0.253	-0.176	-0.544	-0.445
$\alpha = 0.02$	0	3000	1.309	0.713	0.222	0.146	0.031	0.042	-0.195	-0.090	-0.470	-0.265
		6000	1.346	0.876	0.209	0.167	0.011	0.038	-0.223	-0.127	-0.508	-0.346
		9000	1.360	0.983	0.204	0.183	0.003	0.037	-0.233	-0.148	-0.523	-0.395
		12000	1.367	1.065	0.201	0.196	-0.001	0.037	-0.239	-0.164	-0.530	-0.432
	1	3000	-0.581	-0.275	-0.826	-0.419	-1.114	-0.597	-1.461	-0.826	-1.895	-1.136
		6000	-0.636	-0.363	-0.890	-0.541	-1.190	-0.764	-1.551	-1.051	-2.003	-1.438
		9000	-0.656	-0.416	-0.914	-0.617	-1.217	-0.868	-1.584	-1.192	-2.043	-1.630
		12000	-0.666	-0.455	-0.926	-0.674	-1.232	-0.946	-1.601	-1.298	-2.063	-1.773
	2	3000	0.388	0.231	0.222	0.146	0.031	0.042	-0.195	-0.090	-0.470	-0.265
		6000	0.380	0.272	0.209	0.167	0.011	0.038	-0.223	-0.127	-0.508	-0.346
		9000	0.377	0.301	0.204	0.183	0.003	0.037	-0.233	-0.148	-0.523	-0.395
		12000	0.376	0.324	0.201	0.196	-0.001	0.037	-0.239	-0.164	-0.530	-0.432

V.5.3. Effet de t_2

L'effet de l'épaisseur de la plaque composite t_2 sur les contraintes d'interface pour une poutre en BA poreuse renforcée par matériaux composites est illustré dans la figure V.10. et le tableau V.10.

Les contraintes d'interface augment progressivement avec l'augmentation de l'épaisseur de la plaque composite (t_2), et ce, indépendamment de la proportion de W_{f1} . De plus, pour une épaisseur de plaque composite (t_2) donnée, des valeurs plus élevées de W_{f1} entraînent une augmentation directe et significative des contraintes d'interface.

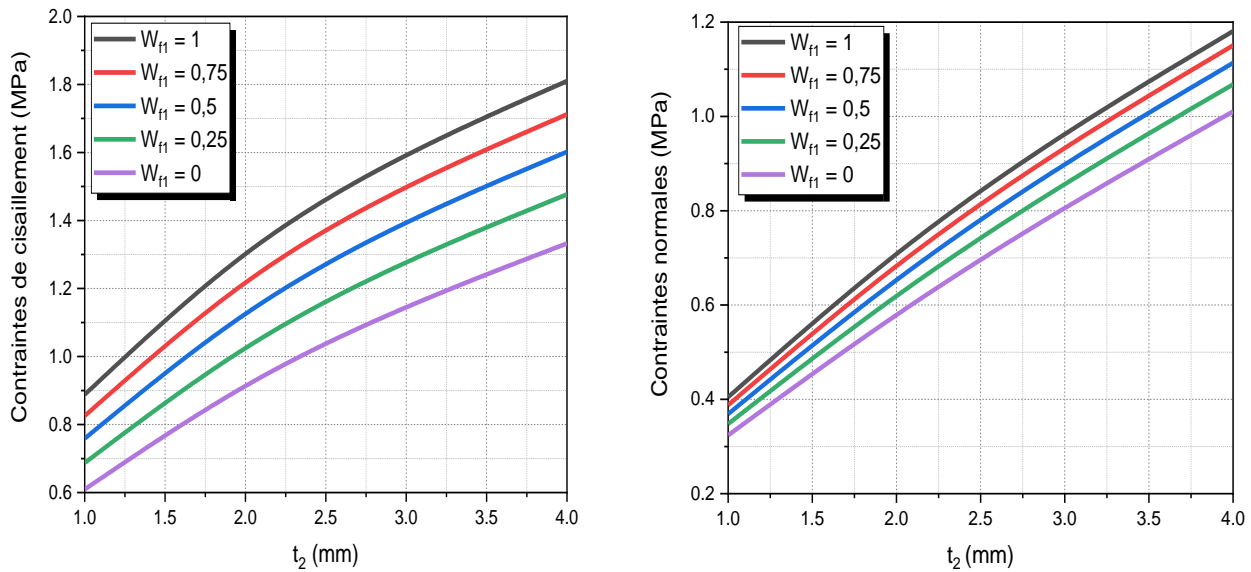


Figure V.10 : Effet de l'épaisseur de la plaque composite t_2 sur les contraintes d'interface pour une poutre en BA poreuse renforcée par matériaux composites (section en T).

Tableau V.9 : Effet de l'épaisseur de la plaque composite t_2 sur les contraintes d'interface pour une poutre en BA poreuse renforcée par matériaux composites (section en T).

				$W_{f1} = 1$		$W_{f1} = 0.75$		$W_{f1} = 0.5$		$W_{f1} = 0.25$		$W_{f1} = 0$		
α	$\frac{P_1}{P_2}$	t_2 (mm)	τ		σ		τ		σ		τ		σ	
			(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)		
$\alpha = 0$	0	1.0	0.882	0.402	0.820	0.385	0.754	0.367	0.683	0.346	0.606	0.322		
		2.0	1.294	0.704	1.210	0.678	1.119	0.649	1.018	0.615	0.907	0.575		
		3.0	1.583	0.957	1.489	0.928	1.385	0.893	1.269	0.851	1.138	0.800		
		4.0	1.801	1.175	1.703	1.144	1.593	1.107	1.468	1.062	1.325	1.004		
	1	1.0	-2.059	-0.905	-2.344	-1.064	-2.682	-1.263	-3.095	-1.521	-3.619	-1.870		
		2.0	-0.618	-0.295	-0.864	-0.439	-1.152	-0.618	-1.500	-0.849	-1.935	-1.160		
		3.0	0.138	0.129	-0.089	-0.005	-0.355	-0.173	-0.676	-0.390	-1.076	-0.683		
		4.0	0.635	0.463	0.422	0.338	0.172	0.180	-0.130	-0.026	-0.508	-0.305		
	2	1.0	-0.571	-0.243	-0.745	-0.332	-0.948	-0.441	-1.191	-0.580	-1.493	-0.767		
		2.0	0.361	0.217	0.196	0.132	0.004	0.027	-0.221	-0.105	-0.496	-0.282		
		3.0	0.887	0.559	0.726	0.477	0.540	0.375	0.320	0.245	0.052	0.073		
		4.0	1.247	0.837	1.091	0.759	0.910	0.661	0.695	0.535	0.432	0.367		
$\alpha = 0.01$	0	1.0	0.888	0.405	0.826	0.388	0.759	0.369	0.687	0.348	0.610	0.324		
		2.0	1.301	0.708	1.217	0.683	1.125	0.653	1.025	0.619	0.913	0.579		
		3.0	1.592	0.962	1.498	0.933	1.393	0.898	1.277	0.856	1.145	0.805		
		4.0	1.810	1.181	1.712	1.150	1.602	1.114	1.477	1.068	1.332	1.010		
	1	1.0	-2.039	-0.896	-2.324	-1.055	-2.661	-1.253	-3.073	-1.510	-3.596	-1.859		
		2.0	-0.600	-0.285	-0.845	-0.429	-1.133	-0.607	-1.481	-0.838	-1.915	-1.148		
		3.0	0.155	0.139	-0.072	0.006	-0.338	-0.162	-0.658	-0.378	-1.057	-0.670		
		4.0	0.651	0.474	0.439	0.349	0.189	0.192	-0.113	-0.013	-0.490	-0.292		
	2	1.0	-0.558	-0.237	-0.732	-0.326	-0.935	-0.435	-1.178	-0.574	-1.480	-0.760		
		2.0	0.374	0.224	0.209	0.139	0.017	0.035	-0.208	-0.098	-0.483	-0.274		
		3.0	0.900	0.566	0.739	0.485	0.553	0.383	0.333	0.254	0.065	0.082		
		4.0	1.260	0.845	1.104	0.768	0.923	0.670	0.708	0.545	0.445	0.376		

$\alpha = 0.02$	0	1.0	0.894	0.407	0.831	0.390	0.764	0.372	0.692	0.350	0.614	0.326
		2.0	1.309	0.713	1.225	0.687	1.132	0.657	1.031	0.623	0.919	0.583
		3.0	1.600	0.968	1.506	0.938	1.401	0.903	1.284	0.862	1.152	0.811
		4.0	1.819	1.187	1.721	1.157	1.610	1.120	1.485	1.074	1.340	1.017
	1	1.0	-2.019	-0.887	-2.303	-1.045	-2.640	-1.243	-3.050	-1.499	-3.573	-1.847
		2.0	-0.581	-0.275	-0.826	-0.419	-1.114	-0.597	-1.461	-0.826	-1.895	-1.136
		3.0	0.172	0.150	-0.054	0.017	-0.320	-0.150	-0.640	-0.366	-1.038	-0.657
		4.0	0.668	0.485	0.456	0.360	0.207	0.204	-0.095	-0.001	-0.472	-0.278
	2	1.0	-0.544	-0.232	-0.719	-0.320	-0.922	-0.428	-1.164	-0.567	-1.466	-0.753
		2.0	0.388	0.231	0.222	0.146	0.031	0.042	-0.195	-0.090	-0.470	-0.265
		3.0	0.914	0.574	0.752	0.493	0.566	0.392	0.346	0.263	0.078	0.091
		4.0	1.273	0.854	1.117	0.777	0.936	0.680	0.721	0.554	0.458	0.386

V.5.4. Effet de t_a

L'impact de l'épaisseur de la couche d'adhésive t_a sur les contraintes d'interface (cisaillement et normale) d'une poutre poreuse en béton armé renforcée par des matériaux composites est visualisé dans la Figure V.10.

On observe que la valeur des contraintes d'interface diminue de manière progressive avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésive (t_a), quel que soit le mélange de fibres (W_{f1}). Par ailleurs, pour une épaisseur t_a constante, la proportion de W_{f1} exerce une influence directe sur l'amplitude de ces contraintes, des valeurs plus élevées de W_{f1} entraînant des contraintes d'interface accrues.

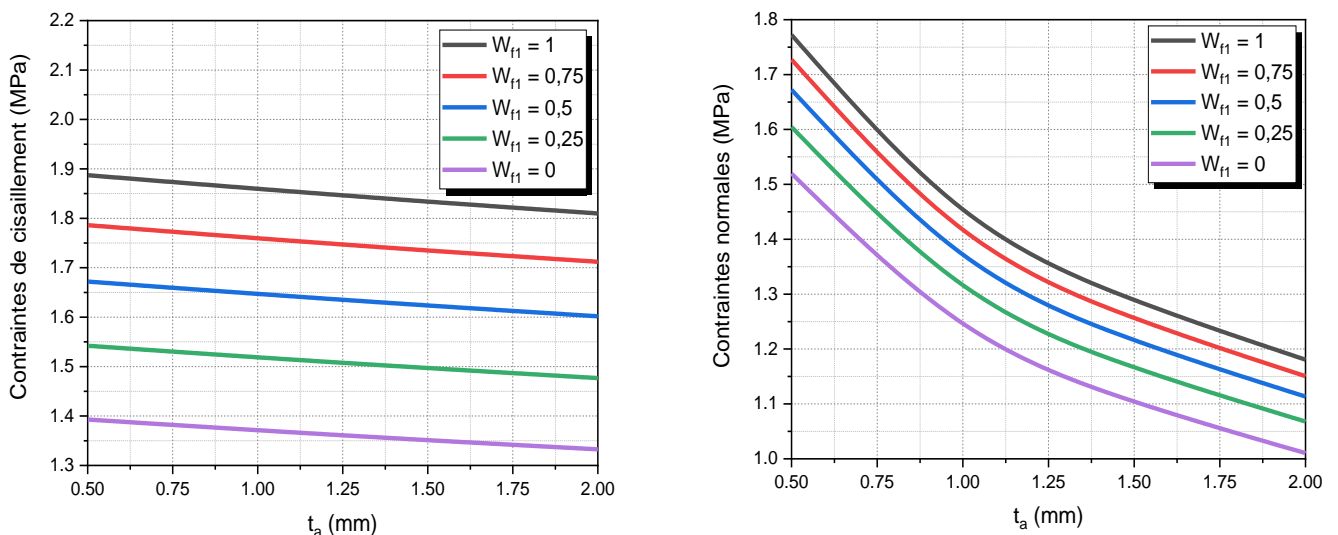


Figure V.11 : Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive t_a sur les contraintes d'interface pour une poutre en BA poreuse renforcée par matériaux composites (section en T).

Tableau V.10 : Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive t_a sur les contraintes d'interface pour une poutre en BA poreuse renforcée par matériaux composites (section en T).

		$Wf_1 = 1$		$Wf_1 = 0.75$		$Wf_1 = 0.5$		$Wf_1 = 0.25$		$Wf_1 = 0$		
$\frac{P_1}{P_2}$	t_a (mm)	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	
		(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	
$\alpha = 0$	0	0.5	1.879	1.764	1.778	1.719	1.664	1.664	1.534	1.596	1.385	1.511
		1.0	1.851	1.447	1.751	1.410	1.639	1.365	1.511	1.309	1.364	1.239
		1.5	1.825	1.283	1.726	1.250	1.615	1.210	1.489	1.160	1.344	1.098
		2.0	1.801	1.175	1.703	1.144	1.593	1.107	1.468	1.062	1.325	1.004
	1	0.5	0.622	0.662	0.397	0.470	0.132	0.228	-0.188	-0.088	-0.589	-0.517
		1.0	0.627	0.552	0.407	0.396	0.147	0.198	-0.167	-0.059	-0.560	-0.409
		1.5	0.631	0.498	0.415	0.360	0.160	0.186	-0.148	-0.040	-0.533	-0.348
		2.0	0.635	0.463	0.422	0.338	0.172	0.180	-0.130	-0.026	-0.508	-0.305
	2	0.5	1.282	1.241	1.118	1.122	0.927	0.973	0.701	0.781	0.424	0.523
		1.0	1.270	1.022	1.109	0.925	0.921	0.804	0.699	0.647	0.427	0.437
		1.5	1.258	0.910	1.100	0.825	0.915	0.718	0.696	0.579	0.430	0.394
		2.0	1.247	0.837	1.091	0.759	0.910	0.661	0.695	0.535	0.432	0.367
$\alpha = 0.01$	0	0.5	1.887	1.772	1.786	1.727	1.672	1.672	1.542	1.605	1.393	1.520
		1.0	1.860	1.454	1.760	1.417	1.647	1.372	1.519	1.316	1.371	1.246
		1.5	1.834	1.290	1.735	1.257	1.624	1.217	1.497	1.167	1.351	1.104
		2.0	1.810	1.181	1.712	1.150	1.602	1.114	1.477	1.068	1.332	1.010
	1	0.5	0.640	0.678	0.415	0.487	0.151	0.246	-0.169	-0.068	-0.569	-0.496
		1.0	0.644	0.565	0.424	0.409	0.165	0.213	-0.149	-0.043	-0.541	-0.392
		1.5	0.648	0.509	0.432	0.372	0.177	0.199	-0.130	-0.026	-0.514	-0.333
		2.0	0.651	0.474	0.439	0.349	0.189	0.192	-0.113	-0.013	-0.490	-0.292
	2	0.5	1.295	1.253	1.131	1.135	0.941	0.987	0.714	0.795	0.438	0.538
		1.0	1.283	1.032	1.122	0.936	0.934	0.815	0.712	0.658	0.440	0.449
		1.5	1.271	0.919	1.113	0.834	0.928	0.727	0.710	0.590	0.443	0.405
		2.0	1.260	0.845	1.104	0.768	0.923	0.670	0.708	0.545	0.445	0.376
$\alpha = 0.02$	0	0.5	1.896	1.781	1.795	1.736	1.680	1.681	1.550	1.614	1.401	1.529
		1.0	1.868	1.462	1.768	1.425	1.655	1.380	1.527	1.324	1.379	1.254
		1.5	1.843	1.296	1.744	1.263	1.632	1.223	1.505	1.174	1.359	1.111
		2.0	1.819	1.187	1.721	1.157	1.610	1.120	1.485	1.074	1.340	1.017
	1	0.5	0.657	0.695	0.434	0.505	0.170	0.264	-0.150	-0.049	-0.549	-0.475
		1.0	0.661	0.579	0.442	0.424	0.183	0.228	-0.130	-0.028	-0.521	-0.375
		1.5	0.665	0.521	0.449	0.385	0.195	0.212	-0.112	-0.012	-0.496	-0.318
		2.0	0.668	0.485	0.456	0.360	0.207	0.204	-0.095	-0.001	-0.472	-0.278
	2	0.5	1.309	1.266	1.145	1.148	0.954	1.000	0.728	0.809	0.452	0.553
		1.0	1.296	1.043	1.135	0.947	0.948	0.826	0.725	0.670	0.454	0.461
		1.5	1.284	0.929	1.126	0.844	0.942	0.737	0.723	0.600	0.456	0.415
		2.0	1.273	0.854	1.117	0.777	0.936	0.680	0.721	0.554	0.458	0.386

V.5.5. Effet de Ef2

L'effet de l'épaisseur de module d'élasticité Ef2 sur les contraintes d'interface pour une poutre en BA poreuse renforcée par matériaux composites est illustré dans la figure V.11.

On constate que les contraintes d'interface (cisaillement et normale) augmentent avec l'augmentation de la valeur de Ef_2 , quel que soit le pourcentage de Wf_1 .

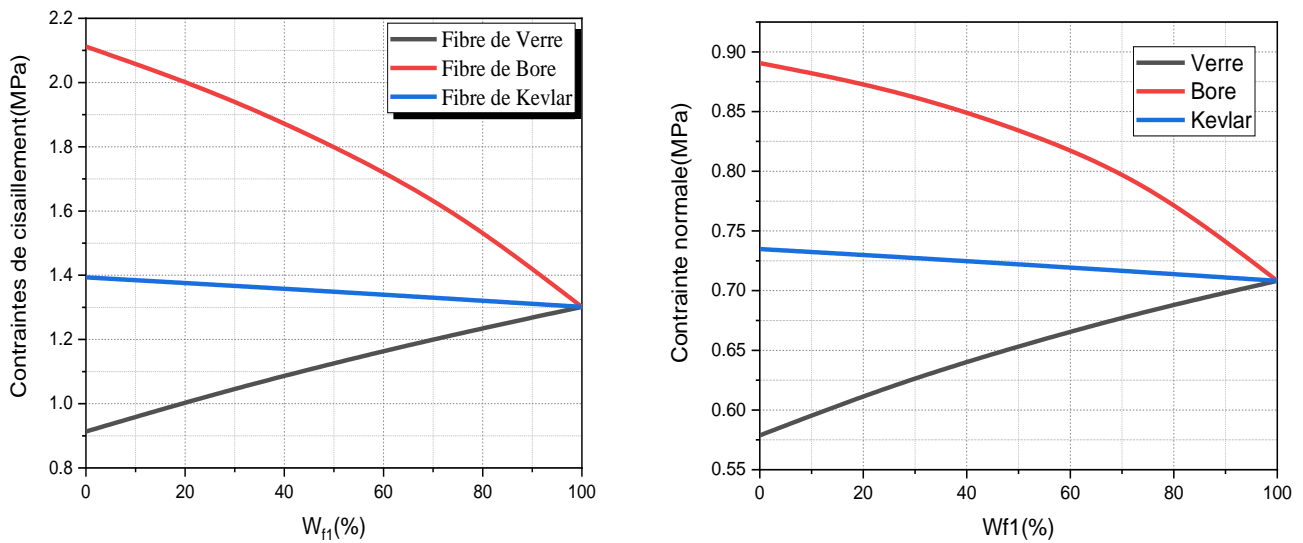


Figure V.12 : Effet de module d'élasticité Ef_2 sur les contraintes d'interface pour une poutre en BA poreuse renforcée par matériaux composites (section en T).

V.6. Conclusion

Dans cette étude, une analyse paramétrique a été menée afin d'évaluer l'influence de plusieurs facteurs sur les contraintes interfaciales dans les poutres en béton armé renforcées par matériaux composites. L'objectif était d'identifier les paramètres les plus sensibles et de mieux orienter les choix techniques pour un renforcement plus performant. Les résultats obtenus permettent de dégager plusieurs tendances significatives :

- ❖ L'augmentation de la longueur non renforcée (a) provoque une élévation des contraintes normales et de cisaillement à l'interface.
- ❖ Une rigidité plus élevée de la couche adhésive (Ea) entraîne une augmentation des contraintes interfaciales. Une couche trop rigide transmet les efforts plus brusquement, ce qui peut favoriser des décollements.
- ❖ L'épaisseur de la plaque composite (t_2), lorsqu'elle augmente, contribue à amplifier les contraintes. Bien qu'elle améliore la reprise des efforts, elle sollicite davantage l'interface.
- ❖ À l'inverse, une épaisseur plus importante de l'adhésif (t_a) réduit les contraintes normales et de cisaillement. Cela s'explique par un meilleur amortissement et une transition plus progressive des efforts.
- ❖ L'impact du type de fibres est clairement observé à travers l'augmentation des contraintes d'interface (normale et cisaillement) avec la hausse de la valeur de Ef_2 , indépendamment du pourcentage de Wf_1 .

❖ Les efforts de précontrainte (P1 et P2) influencent fortement la distribution des contraintes et peuvent être utilisés comme outil d'optimisation dans la conception du renforcement.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'altération des structures en béton armé représente un enjeu crucial dans le domaine du génie civil, qui découle de diverses contraintes tout au long de leur cycle de vie. Pour résoudre ce problème, l'emploi de matériaux composites s'est révélé être une réponse innovante et efficace, indispensable pour étendre la durée de vie des structures.

Cette recherche a exploré le renforcement du béton armé par matériaux composites, en se concentrant sur l'étude mécanique des contraintes d'interface dans les poutres en béton armé. Après un examen des pathologies fréquentes du béton et des propriétés des composites, le travail a mis en lumière l'importance des phénomènes interfaciaux qui déterminent l'efficacité du renforcement. Un modèle d'analyse rigoureux a été développé pour anticiper ces contraintes de cisaillement et normales, dont les pics sont identifiés aux limites du renfort.

Dans le cadre de ce travail, nous avons développé une analyse théorique rigoureuse pour établir les expressions précises des contraintes normales et de cisaillement au niveau de la couche adhésive. Ce modèle, validé par comparaison avec des méthodes reconnues dans la littérature (Tounsi et Rabahi), a démontré sa fiabilité et sa capacité à prédire avec exactitude le comportement interfacial. Une étude paramétrique exhaustive a ensuite été menée pour évaluer l'impact des paramètres clés sur la répartition de ces contraintes dans les poutres composites en béton armé. Les variables étudiées comprenaient la longueur non renforcée (a), la rigidité (E_a) et l'épaisseur (t_a) de la couche adhésive, l'épaisseur de la plaque composite (t_2), le module d'élasticité des fibres (E_f), ainsi que les efforts de précontrainte (P_1 et P_2).

Cette analyse a permis de tirer les conclusions significatives suivantes :

- ✓ Le maximum des contraintes d'interface (pics) est observé au bord de la plaque de renfort, puis ces contraintes diminuent rapidement (brusquement) dans le cas des contraintes normales et progressivement pour les contraintes de cisaillement, tendant toutes les deux vers une valeur quasi nulle à mi-travée, ce qui confirme la concentration des efforts aux extrémités du renfort.
- ✓ L'augmentation de la longueur non renforcée (a), de la rigidité de la couche adhésive (E_a), et de l'épaisseur de la plaque composite (t_2) a tendance à accroître les contraintes normales et de cisaillement à l'interface, ce qui met en évidence l'importance d'une conception et d'un dimensionnement judicieux de ces paramètres pour maîtriser le risque de décollement.

- ✓ Le maximum des contraintes normales et de cisaillement diminue de manière notable à mesure que l'épaisseur de la couche d'adhésif (t_a) augmente, soulignant le rôle bénéfique d'une couche adhésive plus épaisse dans la redistribution des contraintes et la réduction des pics.
- ✓ L'impact du type de fibres est évident : l'augmentation de E_f fait croître les contraintes d'interface (normales et de cisaillement) quel que soit W_f , mais les fibres de Bore sont les moins sollicitées, contrairement aux fibres de Verre ou de Kevlar qui voient leurs contraintes augmenter rapidement.
- ✓ De plus, les efforts de précontrainte (P_1 et P_2) ont démontré un effet notable sur la redistribution des contraintes dans la zone d'interface, offrant une voie potentielle pour optimiser davantage la performance des renforcements.

En somme, ce travail a permis de fournir un cadre d'analyse précis et des recommandations de conception concrètes pour le renforcement des structures en béton armé par matériaux composites. Ces résultats contribuent à une meilleure compréhension des phénomènes d'interface et guideront les ingénieurs dans le choix des matériaux et des paramètres géométriques, afin d'assurer l'efficacité, la fiabilité et la durabilité des ouvrages réparés.

Afin de compléter les résultats obtenus et de mieux cerner le comportement mécanique des poutres en béton armé poreuse renforcées par des plaques composites, nous envisageons les perspectives suivantes pour la suite de notre recherche :

- ✓ Effectuer des études numériques par des logiciels de modélisations et confronter les résultats qui seront trouvés avec ceux calculés par les modèles analytiques.
- ✓ Utiliser une autre loi de mélange du composite et voir leur influence sur le renforcement des structures en béton armé.
- ✓ Utiliser pour le même modèle de poutre, un autre type de matériaux composites (FGM) et voir comportement global de la structure renforcée.

Référence bibliographique

(Ait Ameur Meziane M.2025). Université Ibn Khaldoun Tiaret, Département génie civil « cours de pathologie et Réhabilitation des ouvrages d'art 2 ème année Master voies et ouvrages d'arts.

(AMEUR, 2009). « Analyse et modélisation des effets de vieillissement des matériaux composites sur les contraintes d'interface des poutres métalliques renforcées par des plaques FRP », thèse doctorat : Université Djillali Liabes de Sidi Belabbes, 2009.

(Arnaud, 2021) « Récupérer les fibres de carbone des matériaux composites grâce aux puissances pulsées ». *Technique de l'ingénieur*. <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/recuperer-les-fibres-de-carbone-des-materiaux-composites-grace-aux-puissances-pulsees-92814/>.

(BADOUR, 2018). "Utilisation des matériaux composites pour la réparation parasismique des voiles en béton armé",Mémoire de Master, université ibn khaldoun de tiaret.

(BENARBIA, 2018). « Etude du comportement mécanique des poutres fissurées et renforcées par des matériaux composites ». Thèse Doctorat, Université Djilali liabes de Sidi Bel-Abbès.

(Benferhat, 2021). “Effect of air bubbles in concrete on the mechanical behavior of RC beams strengthened in flexion by externally bonded FRP plates under uniformly distributed loading” *Composite Materials and Engineering*, Vol. 3, No. 1 (2021) 41-55

(BENIDA and BELMOKHTAR, 2023). « Modélisation des contraintes de cisaillement et normale dans les poutres consoles en béton armé endommagée réparé par différents types de composites : effet 'orientation des fibres ». Mémoire de fin d'études en Master. Université Ibn Khaldoun Tiaret.

(Berthelot J.M., 2002) "matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures", TEC et DOC 4eme édition.

(Bouabdellah,2023). « Analyse des contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par une plaque en FGM poreux précontraint ». Mémoire de fin d'études en Master. Université Ibn Khaldoun Tiaret.

(BOUACHRIA and KARI, 2021). « Analyse mécanique des contraintes d'interface d'une poutre console en béton armé endommagée réparée par matériaux composites ». Mémoire de fin d'études en Master. Université Ibn Khaldoun Tiaret.

(Boulaziz A.2014), « Analyse des contraintes d'interfaces dans les poutres en béton armé renforcées par des stratifiés en fibre de carbone: Effet de fluage ». Mémoire de fin d'études en Master. Université Ibn Khaldoun Tiaret.

(Bresson J.1971), “Nouvelles recherches et applications concernant l'utilisation des collages dans les structures béton plaqué”. *Annales de l'ITBTP*, 278.

(El Houssain, 2004). "Contribution mécanique de dalles en béton armé renforcées par matériaux composites", thèse de doctorat, L'université Claude Bernard- Lyon 1, Lyon, France, page 233

(Fanning P.J, Kelly O. 2001) “Ultimate response of RC beams strengthened with CFRP plates”, *ASCE Journal of composites for construction*, May 2001, pp.122 – 127.

(GHLIB and FERHAT, 2020). « Analyse analytique des contraintes d'interface d'une poutre console en béton armé renforcée par matériaux composites ». Mémoire de mastère en Génie Civil, Université Ibn Khaldoun Tiaret.

(Hassaine Daouadji et al. 2021). “Hyperstatic steel structure strengthened with prestressed carbon/glass hybrid laminated plate” *Coupled Systems Mechanics*, Vol. 10, No. 5 (2021) 393-414

(Hollaway L.C, Leeming M.B.2001) Hollaway L.C, Leeming M.B, Strengthening of reinforced concrete structures using externally –bonded FRP composites in structural and civil engineering , Woodhead Publishing Limited, Cambridge England.

(Lucas, 2025) « Thermodurcissable vs thermoplastique : définition et différences ». *Thermodurcissable vs thermoplastique : définition et différences*. <https://www.rapiddirect.com/fr/blog/thermoset-vs-thermoplastic-differences/>.

(MEBAREK and MENACER, 2022) « Contribution à l'étude de l'efficacité d'une poutre console en FGM renforcée par différents types de composites ». Mémoire de fin d'études en Master. Université Ibn Khaldoun Tiaret.

(Neerden 2020) ; « La fibre de carbone ». <https://couleur-science.eu/?d=bb7ac8--cest-quoi-la-fibre-de-carbone>.

(NGO Minh Duc, 2016). « Renforcement au cisaillement des poutres en béton armé par matériaux composites naturels (fibre de lin) ». Thèse de doctorat, université de Lyon 2016.

(Nguyen D.M, Chan T.K and Cheong H.K.2001). “failure and bond development length of CFRP-concrete beams”. *Journal of Composites for Construction*, 5 (1), 12-17.

(Quantill R.J, Hollaway L.C and Throne A.M.1996) Quantill R.J, Hollaway L.C and Throne A.M. Experimental and analytical investigation of FRP strengthened beam response: part I. *Magazine of concrete research*, vol 1 77, issue 48, 331 -342.

(RABAHI, 2016) « Contribution à l'étude de l'efficacité des matériaux composites pour le renforcement et la réparation des structures en béton armé ». Thèse de doctorat, Université Ibn Khaldoun de Tiaret.

(Rahimi et Hutchinson. 2001) “Concrete beams strengthened with externally bonded FRP plates”, *ASCE Journal of Composites for Construction*, February 2001, pp44-56.

(SAFAR and TOUATI, 2024). « Etude des poutres mixtes en acier par collage des dalles en matériaux légers : Analyse et modélisation ». Mémoire de fin d'études en Master. Université Ibn Khaldoun Tiaret.

(Spadea et al, 1998) « Structural Behavior of composite RC beams with externally bonded CFRP ». *ASCE, Journal of composites for construction*, Vol.2,N° .3,pp.132-137.

(Taljsten B.2003), Taljsten B., “Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets”. *Construction and building Materials*, vol 17, 15-26.

(Tounsi A. 2005) “Improved theoretical solution for interfacial stresses in concrete beams strengthened with FRP plate”. *International Journal of Solids and Structures*, 43 (14-15), 41544174.

(ZE YI WU, 2004) « Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton armé pré-fissurées et renforcées par matériaux composites sous chargement statique et de

fatigue », THÈSE Pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES.

(ZINE A, 2010) « Modélisation d'une plaque rectangulaire en composite en vibration sous l'effet thermique avec variation linéaire d'épaisseur ». Mémoire de magister, université de Boumerdès 2010.