



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES  
DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

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

Spécialité : Génie civil

Option : Structures

Présenté par :

DAHAM Khedidja

CHAANOUNE Kaouthar Samah

*Sujet du mémoire*

***Modélisation des contraintes de cisaillement et normales  
d'une poutre en béton armé poreuse endommagée réparée par  
matériaux composites***

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

Pr ZIDOUR Mohamed

Dr RABAHI Abderazak

Dr ZOUATNIA Nafissa

Pr AIT AMAR MEZIANE Med

Dr ABDELAZIZ Hadj Henni

Président

Encadreur

Examineur

Examineur

Examineur

2024/2025

## *Remerciement*

Tout d'abord, je remercie le bon Dieu qui m'a doté de la volonté, du courage et surtout de la patience pour produire ce modeste travail et qui m'a aidé à faire face à toutes les difficultés rencontrées lors de son élaboration.

Je voudrais exprimer mes plus profonds remerciements à mes parents, à mes sœurs, à ma famille, pour leurs encouragements, leur patience et leur amour... Ils sont à l'origine de tout ce que j'ai accompli de bien.

Mes très sincères remerciements à mon encadreur de mémoire Dr. RABAHI Abderezak , de m'avoir encadré et dirigé attentivement mes travaux pendant ce travail.

Je tiens à remercier tous les membres du jury qui ont bien voulu consacrer une partie de leur temps précieux à examiner ce travail. Tous les enseignants qui ont contribué à ma formation durant ces années d'études.

# *Dédicace*

*Au nom de dieu et par sa volonté et son aide qui enrichit mes savoirs. Ces savoirs qui m'ont mené à réaliser ce travail, dont j'en suis comblée et fière.*

*A mes chers parents :*

*A mon très cher papa **HOUARI** , t'a présence dans ma vie signifie énormément...*

*A mes chères mères : **KHAIRA Et NAIMA** , si Allah m'a permis d'achever ce travail, c'est grâce à Son aide et à vos prières sincères, Je vous aime.*

*A tous les membres de ma famille, chacun par son nom et sa place, sans oublier mon oncle le professeur **RAGED ABDELMALEK** qui a été ma source de soutien.*

*A mes très chères sœurs.*

*A mes frères.*

*A mes tous amies.*

*A **KAWTHER**, ma chère, celle qui a été ma compagne de route, l'amie de mon cœur, ta place dans mon vie est immense. Reste à jamais mon pilier inébranlable.*

*A ma sœur **FADHILA**, la plus précieuse, et fille de mon âme par le sentiment Je t'amie.*

*A toute la promotion sortante (2024/2025)*

*Pour ceux qui je n'ai pas cité bien sûr ne croyait pas que je vous ai oublié, je vous porte toujours dans mon cœur.*

**KHADIDJA**

## Dédicace

*Au nom de dieu et par sa volonté et son aide qui enrichit mes savoirs. Ces savoirs qui m'ont mené à réaliser ce travail, dont j'en suis comblée et fière.*

*La science consiste à oublier ce qu'on croit savoir, et la sagesse à ne pas s'en soucier.*

*Sans oublier tous ceux qui ont par leurs égards contribués à parfaire mon objectif et qui me font l'éminent honneur avec différence, je tien à leur dédier ce travail :*

*A mes chers parents*

*A mon très cher papa Abdelkader qui m'a encouragé et conseillé pendant mes plus pénibles moments et qui m'a guidé vers le chemin droit.*

*A ma chère mère, pour son amour inconditionnel, ses sacrifices et ses prières silencieuse. Merci pour ta patience, ton soutien et ta force qui m'ont toujours guidée. Ce travail est le fruit de ton dévouement je t'en serai éternellement reconnaissante.*

*A mes très chères sœurs : Hadjer ; Amel ; Mariam ;*

*A mon ange Alia.*

*A mes frères : Zinou, Abderrahmane.*

*A tous les membres de ma famille. Sur tout mon oncle Mouloud*

*A tous mes amies chacun par son nom.*

*A mes neveux : Chakib, Chahine, Mohamed et Ayan*

*Et en fin,*

*A toi, ma précieuse amie Khadîdja, ta présence dans ma vie a été une lumière dans les moments sombres, un soutien sincère, discret mais toujours puissant. Merci pour ton amitié fidèle, ton énergie positive, et ta confiance en moi. Ce travail porte aussi ton empreinte, à travers chaque mot d'encouragement que tu m'as offert.*

*A toute la promotion sortante (2024/2025)*

*Pour ceux qui je n'ai pas cité bien sûr ne croyait pas que je vous ai oublié, je vous porte toujours dans mon cœur*

*Kaouthar*

## Sommaire

<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>III</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>IV</b>
<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VII</b>
<b>ملخص</b> .....	<b>VIII</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....	<b>X</b>
<b>I.1. INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>I.2. PATHOLOGIES ET PRINCIPALES CAUSES DES DÉSORDRES AFFECTANT LES OUVRAGES</b> .....	<b>1</b>
I.2.1. MODIFICATION DES CONDITIONS D'EXPLOITATION DES OUVRAGES .....	1
I.2.2. DÉSORDRES DUS AUX ERREURS DE CONCEPTION OU D'EXÉCUTION.....	2
I.2.3. DÉGRADATION DES MATÉRIAUX.....	4
<b>I.3. MÉTHODES ET TECHNIQUE DE RENFORCEMENT</b> .....	<b>9</b>
I.3.1. MÉTHODES DE RÉPARATION NON STRUCTURALES .....	10
I.3.2. MÉTHODES DE RÉPARATION STRUCTURALES .....	10
I.3.2.1. RÉPARATION PAR BÉTON PROJETÉ.....	10
I.3.2.1. RÉPARATION PAR ADJONCTION D'ARMATURE COMPLÉMENTAIRE.....	11
I.3.2.3. LA TECHNIQUE DE PRÉCONTRAINTÉ ADDITIONNELLE .....	12
I.3.2.4 RÉPARATION PAR COLLAGE DE PLATS MÉTALLIQUES .....	12
<b>I.4. RÉPARATION ET RENFORCEMENT PAR COLLAGE DES MATÉRIAUX COMPOSITES</b> .....	<b>13</b>
I.4.1. UTILISATION DES COMPOSITES DANS LE GÉNIE CIVIL .....	14
I.4.2. REMPLACEMENT DES TÔLES MÉTALLIQUES PAR DES MATÉRIAUX COMPOSITES .....	14
I.4.3. APPLICATION DES MATÉRIAUX COMPOSITES POUR LA RÉPARATION ET LE RENFORCEMENT DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ.....	15
<b>I.5. CONCLUSION</b> .....	<b>20</b>
<b>II.1 INTRODUCTION</b> .....	<b>21</b>
<b>II.2. LE RENFORT</b> .....	<b>21</b>
II.2.1. REVUE DES DIFFÉRENTS RENFORTS DISPONIBLES .....	22
II.2.1.1. LES FIBRES DE CARBONE : .....	22
II.2.1.2. LES FIBRES DE KEVLAR .....	23
II.2.1.3. LES FIBRES DE VERRE .....	24
<b>II.3. LA MATRICE</b> .....	<b>25</b>
II.3.1. NOTION SUR LES MATRICES.....	25
II.3.1.1. LES MATRICES ORGANIQUES .....	26
II.3.1.2. RÉSINES THERMODURCISSABLES (TD).....	26
II.3.1.3. RÉSINES THERMOPLASTIQUES .....	26
II.3.2.1. LES MATRICE MÉTALLIQUE .....	27
<b>II.4. L'ADHÉSIF</b> .....	<b>27</b>
<b>II.5. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES COMPOSITE</b> .....	<b>28</b>
<b>II.6. APPLICATION DES MATÉRIAUX COMPOSITES</b> .....	<b>28</b>
II.6.1. LES COMPOSITES DANS LA CONSTRUCTION CIVILE.....	28
II.6.2. CONSTRUCTION AUTOMOBILE .....	29
II.6.3. LA CONSTRUCTION DES NAVIRES EN MATÉRIAUX COMPOSITES.....	29
II.6.4. LES COMPOSITES DANS LE SECTEUR MÉDICAL.....	29
<b>II.7. UTILISATION DES COMPOSITES &lt;&lt;FRP&gt;&gt;EN GÉNIE CIVIL</b> .....	<b>30</b>

<b>II.8. INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT SUR LE COMPORTEMENT DES COMPOSITES .....</b>	<b>31</b>
II.8.1. LA TEMPÉRATURE.....	31
II.8.2. L'HUMIDITÉ.....	31
II.8.3. FLUAGE ET CORROSION SOUS CONTRAINTE .....	31
<b>II.9. CONCLUSION.....</b>	<b>31</b>
<b>III.1. INTRODUCTION .....</b>	<b>33</b>
<b>III.2. COMPORTEMENT MÉCANIQUE D'UNE SECTION DE POUTRE EN BÉTON ARMÉ RENFORCÉE.....</b>	<b>33</b>
<b>III.3. MÉCANISME DE RUPTURE DES POUTRES RENFORCÉES PAR MATÉRIAUX COMPOSITES .....</b>	<b>35</b>
III.3.1. RUPTURE DUE À LA FLEXION.....	35
III.3.2. RUPTURE DUE AU CISAILLEMENT.....	36
III.3.3. RUPTURE DUE AU DÉCOLLEMENT .....	37
<b>III.4. FACTEURS AYANT UNE INFLUENCE SUR LE COMPORTEMENT DES POUTRES RENFORCÉES.....</b>	<b>38</b>
<b>III.5. CONCLUSION .....</b>	<b>39</b>
<b>IV.1. INTRODUCTION .....</b>	<b>41</b>
<b>IV.2. ANALYSE .....</b>	<b>41</b>
IV.2.1. EQUATIONS D'ÉLASTICITÉ .....	42
IV.2.2. LA DISTRIBUTION DES CONTRAINTES DE CISAILLEMENT DANS L'INTERFACE COMPOSITE – BÉTON.....	44
IV.2.3. LA DISTRIBUTION DES CONTRAINTES NORMALES DANS L'INTERFACE COMPOSITE – BÉTON .....	46
<b>IV.3. CONCLUSION .....</b>	<b>48</b>
<b>V.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>50</b>
<b>V.2. PRÉSENTATION DU MODÈLE.....</b>	<b>50</b>
V.2.1. VALIDATION DU MODÈLE .....	51
<b>V.4. ETUDE PARAMÉTRIQUE.....</b>	<b>52</b>
V.4.1. EFFET DE LA LONGUEUR NON RENFORCÉE « A ».....	52
V.4.2. EFFET DE TA .....	54
V.4.3. EFFET DE $T_2$ .....	55
V.4.4. EFFET DE $E_A$ .....	57
<b>V.5. CONCLUSION.....</b>	<b>58</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>60</b>
<b>RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	

## Liste des tableaux

<b>Tableau V.1:</b> Propriétés géométriques et mécaniques des matériaux.....	51
<b>Tableau V.2 :</b> chargement et géométrie. ....	51
<b>Tableau V.3 :</b> Effet de la longueur non renforcée a sur les contraintes d'interface pour une poutre en BA poreuse endommagée réparée par matériaux composite. ....	52
<b>Tableau V.4 :</b> Effet de l'épaisseur de l'adhésif $t_a$ sur les contraintes d'interface pour une poutre en béton armé poreuse endommagée réparée par matériau composite. ....	54
<b>Tableau V.5 :</b> Effet de l'épaisseur $t_2$ sur les contraintes d'interface pour une poutre en béton armé poreuse endommagée réparée par matériau composite.....	55
<b>Tableau V.6.</b> 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). ...	57

## Liste des figures

Figure I.1 : Processus général de la carbonatation .....	4
Figure.I.2: l'érosion du béton.....	5
Figure.I.4: Grave conséquence de collision contre la pile d'un pont (d'un bateau). .....	6
Figure.I.5: Grave conséquence de collision contre la pile d'un pont (d'un véhicule) .....	6
Figure.I.6: Effet du gel-dégel sur le béton : écaillage du béton d'enrobage et corrosion des armatures. ....	7
Figure.I.7 : Attaque sulfatique.....	7
Figure.I.9: Tassement différentiel .....	8
Figure.I.10: Séisme de Niigata 1964 Quartier Kawagishi-Cho .....	9
Figure I.11: Béton projeté par voie humide .....	11
Figure I.12 : Réparation de poutre par adjonction d'armature.....	11
Figure I.13 : La technique de précontrainte additionnelle .....	12
Figure I.14: renforcement par collage de plats métalliques .....	13
Figure I.15: renforcement en fibres de carbone .....	16
Figure I.16: Décapage .....	17
Figure I.17: Brossage de l'élément .....	17
Figure I.18: Injection de la résine.....	18
Figure I.19: lissage de la surface de renforcement.....	18
Figure I.20: Découpage de la tissu .....	18
Figure I.21: Application et accrochage .....	19
Figure I.22: Enroulement par les fibres.....	19
Figure I.23: Application de la couche d'accrochage .....	19
Figure II.1 : Exemple d'un matériau composite.....	21
Figure II.2: La classification des types de renforts. ....	22
Figure II.3: Exemples des fibres de carbone. ....	23
Figure II.4: Fibre d'Aramide (kevlar). ....	24
Figure II.5: fibre de verre .....	25
Figure.II.5:préparation de la colle .....	28
Figure II.6: Construction des navires en matériaux composites. ....	29
Figure II.7 : Applications des FRP en génie civil, a) Pont de l'Autoroute 55 Nord (Magog – 2002), b) Pont Wotton (Municipalité de Wotton – 2001), (c) le renforcement d'une poutre par lamelles en FRPC. ....	30
Figure III.1 : Les trois phases de comportement d'une poutre en béton armé fléchie renforcée par un stratifié en composite. ....	34
Figure III.2 : comportement structural d'une poutre renforcée.....	34
Figure III.3 : Modes de rupture des poutres renforcées de matériaux composite .....	35
Figure III.4 : Essai flexion 4point sur une poutre BA renforcée avant et après la rupture par peeling-off. ....	36
Figure III.5 : Mode de rupture (a)Rupture en flexion (avec une compression de béton );(b) Rupture en flexion.....	36
Figure III.6 : Rupture en cisaillement. ....	37
Figure III.7 : Rupture d'une poutre renforcée par décollement du renfort .....	37
Figure III.8 : Différents modes de rupture .....	38
Figure IV.1: Poutre en béton armé simplement appuyée renforcée par une plaque composite. ....	41
Figure IV.2 : Un segment différentiel de la poutre en béton renforcée par collage de composite .....	42

Figure V.1 : Les caractéristiques géométriques des poutres en béton armé étudiées. ....	50
Figure V.2 : Comparaison des contraintes d'interface d'une poutre en BA poreuse endommagée réparée par matériaux composites.....	52
Figure V.3 : Effet de la longueur non renforcée $a$ sur les contraintes d'interface pour une poutre en béton armé poreuse endommagée réparée par matériau composite. ....	53
Figure V.4 : Effet de l'épaisseur de l'adhésif $t_a$ sur les contraintes d'interface pour une poutre en béton armé poreuse endommagée réparée par matériau composite. ....	54
Figure V.5 : Effet de l'épaisseur $t_2$ sur les contraintes d'interface pour une poutre en béton armé poreuse endommagée réparée par matériau composite. ....	56
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 endommagée réparée par matériau composite. ....	57

## *Résumé*

Dans le secteur de la construction, le béton armé est l'un des matériaux les plus utilisés pour la réalisation des bâtiments et des ouvrages d'art. En raison de la longue durée de vie des infrastructures, un grand nombre de structures se retrouvent aujourd'hui dégradées, suite à divers facteurs tels que les accidents routiers, l'augmentation du trafic, les modifications de charges ou encore les conditions climatiques extrêmes.

Pour faire face à ces détériorations, deux solutions principales s'offrent aux maîtres d'ouvrage : la reconstruction ou la réparation. La reconstruction, bien qu'efficace, reste une option très coûteuse et difficilement applicable à toutes les structures, en particulier les ouvrages historiques.

La réparation est donc souvent privilégiée, car elle permet de maintenir les ouvrages en bon état de service à moindre coût. Parmi les techniques de renforcement les plus courantes, l'application de matériaux composites sur les éléments en béton armé s'impose progressivement. Cette méthode se distingue par sa facilité de mise en œuvre, sa rapidité, ainsi que son coût relativement abordable, ce qui en fait une solution technique de plus en plus appréciée.

Le présent travail propose une modélisation analytique rigoureuse de ce phénomène, appliquée à une poutre en béton armé poreuse endommagée renforcée par une plaque composite. L'étude permet de déterminer la répartition des contraintes à l'interface à partir des champs de déplacement et de déformation, et d'évaluer l'effet de différents paramètres tels que l'effet d'endommagement, la rigidité des matériaux, l'épaisseur de l'adhésif et la longueur du renfort.

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

## *Abstract*

In the construction sector, reinforced concrete is one of the most widely used materials for the construction of buildings and civil engineering structures. Due to the long service life of infrastructure, many structures are now deteriorated as a result of various factors, including traffic accidents, increased loads, changes in usage, and extreme weather conditions.

To address these deteriorations, two main solutions are available to project owners: reconstruction or repair. Although effective, reconstruction is a very costly option and is not always feasible, especially for historical structures.

Repair is therefore often preferred, as it allows structures to remain in good service condition at a lower cost. Among the most common strengthening techniques, the application of composite materials to reinforced concrete elements is gradually becoming more widespread. This method is notable for its ease of implementation, speed, and relatively low cost, making it an increasingly popular technical solution.

The present work proposes a rigorous analytical modeling of this phenomenon, applied to a damaged porous reinforced concrete beam strengthened with a composite plate. The study aims to determine the stress distribution at the interface based on displacement and strain fields, and to evaluate the influence of various parameters such as the damage effect, material stiffness, adhesive thickness, and reinforcement length.

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

## ملخص

في قطاع البناء، يُعد الخرسانة المسلحة من أكثر المواد استخدامًا في تشييد المباني والمنشآت الفنية، مثل الجسور. ونظرًا لطول عمر هذه البنى التحتية، فإن عددًا كبيرًا من الهياكل أصبح اليوم متدهورًا، نتيجة لعوامل متعددة مثل حوادث المرور، تزايد حركة المرور، تغيير الأحمال، أو حتى الظروف المناخية القاسية.

ولمواجهة هذه التدهورات، تتوفر أمام أصحاب المشاريع خياران رئيسيان: إعادة البناء أو الترميم. فإعادة البناء، رغم فعاليتها، تبقى خيارًا مكلفًا للغاية ويصعب تطبيقها على جميع الهياكل، خاصة المنشآت التاريخية.

لذا يُفضل غالبًا اللجوء إلى الترميم، لأنه يسمح بالحفاظ على المنشآت في حالة جيدة وبأقل التكاليف. ومن بين تقنيات التدعيم الأكثر شيوعًا، يبرز استخدام المواد المركبة (المتراكبة) المطبقة على العناصر الخرسانية المسلحة. وتتميز هذه الطريقة بسهولة التنفيذ وسرعتها، إضافة إلى تكلفتها المعقولة نسبيًا، مما يجعلها حلًا تقنيًا يحظى بتقدير متزايد.

يقترح هذا العمل نمذجة تحليلية دقيقة لهذا الظاهرة، تُطبق على عتبة خرسانية مسلحة المسامية متضررة تم تدعيمها بواسطة صفيحة مركبة. تُمكن هذه الدراسة من تحديد توزيع الإجهادات عند الواجهة استنادًا إلى مجالات الإزاحة والتشوه، كما تسمح بتقييم تأثير عدة معطيات مثل الضرر، صلابة المواد، سمك المادة اللاصقة، وطول التدعيم

**الكلمات المفتاحية:** المواد المركبة، الرافدة المعدنية، الصاق، انفصال، الجهادات السطحية، اللوحة المتردجة

وظيفية

# *Introduction Générale*

## *Introduction Générale*

La durabilité et la performance structurelle des ouvrages en béton armé représentent aujourd'hui des enjeux fondamentaux dans le domaine du génie civil, tant du point de vue de la sécurité que de la pérennité des infrastructures. Avec le vieillissement progressif du parc bâti, conjugué à l'exposition accrue aux sollicitations mécaniques, aux conditions environnementales sévères, à la corrosion des armatures, ainsi qu'aux éventuelles erreurs de conception ou de mise en œuvre, de nombreuses structures présentent des signes de dégradation prématurée.

Dans ce contexte, la réhabilitation des structures existantes ne constitue plus une option secondaire, mais une nécessité stratégique pour garantir la sécurité des usagers, prolonger la durée de vie des ouvrages et répondre aux normes réglementaires en constante évolution.

Parmi les différentes techniques de renforcement et de réparation développées au cours des dernières décennies, l'utilisation des matériaux composites, tels que les polymères renforcés de fibres de carbone (CFRP) ou de fibres de verre (GFRP), s'est imposée comme une solution à la fois efficace, légère et durable. Ces matériaux, largement utilisés dans l'aéronautique et l'automobile, présentent un excellent rapport résistance/poids, une grande résistance à la corrosion et une facilité de mise en œuvre, ce qui en fait des candidats idéaux pour le renforcement des éléments en béton armé. Une technique couramment adoptée consiste à coller une plaque composite sur l'intrados d'une poutre dans le but d'augmenter sa capacité portante face aux sollicitations de flexion ou d'effort tranchants. Cependant, malgré les avantages indéniables de cette méthode, certaines limitations subsistent, notamment le phénomène de décollement à l'interface entre le béton et la plaque composite. Ce mode de rupture, souvent observé dans les poutres renforcées, est généralement lié à une concentration excessive des contraintes normales et de cisaillement à l'extrémité de la plaque. Il peut compromettre l'efficacité globale du renforcement et mener à une rupture prématurée de l'élément renforcé. Dès lors, une compréhension fine du comportement mécanique à l'interface est indispensable pour garantir la fiabilité de la solution de réparation adoptée. C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent mémoire, qui vise à étudier de manière analytique le comportement d'une poutre en béton armé endommagée, réparée à l'aide de matériaux composites. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les contraintes d'interface normales et de cisaillement qui se développent entre le béton, la couche d'adhésif, et la plaque composite. Pour ce faire, une approche analytique rigoureuse est mise en œuvre,

fondée sur les principes de la théorie de l'élasticité et de la résistance des matériaux. La méthodologie adoptée consiste à établir un champ de déplacement continu dans les différentes couches du système renforcé, à en déduire les champs de déformation correspondants, puis à en extraire les expressions des contraintes mécaniques à l'interface, en fonction des charges appliquées, des propriétés mécaniques des matériaux et des paramètres géométriques du système. Ce modèle, basé sur des hypothèses raisonnables telles que l'adhésion parfaite entre les matériaux et un comportement linéaire élastique, permet de simuler avec précision la distribution des contraintes le long de la plaque composite. Les résultats théoriques obtenus sont confrontés à ceux issus de la littérature afin d'en valider la cohérence et la fiabilité. En complément, une étude paramétrique est menée pour examiner l'influence de divers paramètres tels que la rigidité des matériaux, l'épaisseur de l'adhésif, ou encore la longueur de la plaque de renfort sur l'intensité et la répartition des contraintes d'interface.

Pour mener à bien cette étude, le mémoire est structuré en quatre chapitres principaux :

- Chapitre 1 : Étude bibliographique Ce chapitre dresse un état de l'art des pathologies affectant les structures en béton armé, en identifiant les principales causes de dégradation, et en présentant les différentes techniques de réhabilitation, avec un accent particulier sur l'apport des matériaux composites dans le renforcement structurel.
- Chapitre 2 : Matériaux composites Il s'agit d'un aperçu détaillé des matériaux composites utilisés dans le domaine du génie civil. Sont abordés leurs propriétés mécaniques, leur composition, les types de fibres employées (carbone, verre, aramide), ainsi que leurs avantages et leurs limites dans le cadre du renforcement des structures en béton armé.
- Chapitre 3 : Modes de rupture des poutres renforcées Ce chapitre analyse les différents types de défaillance rencontrés dans les poutres en béton armé renforcées par matériaux composites, notamment la rupture par flexion, par cisaillement, et le décollement de la plaque collée. Une classification des modes de rupture est proposée à partir des études expérimentales et numériques disponibles dans la littérature.
- Chapitre 4 : Analyse théorique des contraintes d'interface Partie centrale du mémoire, ce chapitre présente en détail la modélisation analytique élaborée pour évaluer les contraintes à l'interface béton-composite. La poutre renforcée est représentée par un modèle à trois couches (béton, adhésif, composite), et les équations d'équilibre, de compatibilité et de continuité des déformations sont utilisées pour dériver les expressions des contraintes  $\tau(x)$  et  $\sigma(x)$ , permettant ainsi d'identifier les zones critiques susceptibles de subir un décollement.

Chapitre 05 : Présente la détermination des contraintes d'interface d'une poutre en béton armé poreuse endommagée réparer par collage des plaques en matériaux composites et compare les résultats avec celle de littérature, et voir les différents paramètres qui influent sur le comportement des poutres réhabilité par matériaux composites.

# CHAPITRE I

## *Pathologies et techniques de réparation des ouvrages en béton armé*

## **I.1. Introduction**

Dans le domaine de la construction, une pathologie est un désordre qui endommage la structure d'un ouvrage sous l'effet de différents paramètres (température, humidité, pollution, gel, etc.).

Les pathologies science objective et systématique des maladies en vue d'en trouver le traitement. Elle formule les lois, désigne la terminologie, identifie et classe les causes, Retracer le processus, énumère les symptômes. C'est l'établissement d'un dictionnaire des maladies. La connaissance de la pathologie permet d'établir un diagnostic qui conduira inéluctablement vers l'esquisse d'une solution de réparation, de renforcement ou simplement la mise en place de remèdes préventifs.

Parmi les pathologies les plus courantes, on retrouve la corrosion, la fatigue, la déformation, la fissuration, la dégradation des soudures, etc. Ces facteurs affectent la résistance de la structure métallique, qui diminue progressivement jusqu'à ce que la force appliquée soit supérieure à la résistance et que la structure soit en danger de fissuration.

L'identification et la gestion de ces pathologies sont essentielles pour assurer la sécurité des personnes et des biens. Les inspections régulières et les mesures de prévention et de réparation appropriées peuvent aider à prolonger la durée de vie des structures métalliques et à éviter les défaillances. Les ingénieurs et les spécialistes de la maintenance sont souvent chargés de surveiller l'état des structures métalliques et de prendre des mesures pour garantir leur bon fonctionnement.

Alors dans ce chapitre on va parler sur pathologies et principales causes des désordres affectant les ouvrages.

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

### **I.2.1. Modification des conditions d'exploitation des ouvrages**

L'évolution des conditions de chargement est souvent induite soit par la modification des charges réglementaires sur essieux, soit par une modification de la fréquence des sollicitations qui s'exercent.

Il faut aussi évoquer la nécessité, dans certains cas, de prendre en considération des sollicitations extrêmes (climatiques *ou* accidentelles) qui avaient été sous-estimées lors de l'exécution de l'ouvrage. C'est notamment le cas de la mise en conformité des ponts ou

bâtiments vis-à-vis des sollicitations sismiques ou le renforcement de certains éléments de l'ossature (piles de pont, poutres latérales) vis-à-vis de sollicitations accidentelles telles que l'impact de véhicules. L'apparition de ces endommagements d'origines diverses, peut parfois nécessiter d'effectuer des réparations afin d'augmenter la durée de vie des ouvrages et leur assurer une plus grande fiabilité.

➤ *Effets de la température*

Ces dernières années, des incendies dramatiques ont montré que les règles sur la sécurité dans les tranchées couvertes et les tunnels étaient à revoir et ont montré qu'un incendie pouvait provoquer de graves désordres aux bétons des ouvrages de génie civil. Lors d'un incendie ou d'un choc thermique, l'eau interstitielle se transforme en vapeur et, si cette vapeur ne peut s'échapper assez rapidement, la pression de vapeur devient supérieure à la résistance à la traction du béton, ce qui provoque une sorte d'écaillage de ce dernier. Cet écaillage progresse vers le cœur du matériau tant que l'incendie n'est pas maîtrisé et tant que la température du béton reste élevée. Plus le béton a une perméabilité et une porosité réduites, plus les destructions sont importantes.

➤ *Chargement de fatigue*

La fatigue est un phénomène où les fissures qui se sont développées dans le béton ou les armatures sous l'effet d'un chargement répété conduit à un éclatement du béton d'enrobage et à la rupture de l'acier. La rupture par fatigue peut apparaître si des charges excessives sont appliquées répétitivement. Un exemple est l'affaissement d'une dalle en béton armé dû au chargement répétitif des roues sur un pont.

### **I.2.2. Désordres dus aux erreurs de conception ou d'exécution**

Ces types de problèmes peuvent survenir en raison d'erreurs commises soit lors de la conception de l'ouvrage, soit lors de sa construction. Parmi les conditions souvent mal évaluées, on peut citer l'impact des variations de température sur la structure, une estimation incorrecte des forces de précontrainte, ainsi que des données imprécises sur la relaxation des câbles et leur interaction avec la structure. Un mauvais calcul des dimensions et de l'espacement des cadres pour supporter les forces de cisaillement dans le béton armé peut entraîner des fissurations nécessitant une réhabilitation immédiate de l'ouvrage.(MAHOUZ and NOUARI, 2024)

Des études statistiques menées par le bureau Sécurité de la SOCOTEC en France sur 2979 dossiers de structures en béton ont révélé que le nombre total de sinistres attribuables à des erreurs de conception ou d'exécution se répartissait comme suit :

➤ *Erreurs de conception*

- Erreurs dans le bon choix du matériau constituant l'ouvrage.
- Erreurs dans le pré dimensionnement des éléments.
- Négligence totale de la sismicité de la zone.
- Mauvais choix de la meilleure variante.
- Absence de l'étude comparative technico-économique.
- Structure instable.
- Un tassement.
- Un manque d'armatures.
- Une surcharge dont la structure ne peut pas résister.
- Un manque de joints.(MAHOUZ and NOUARI, 2024)

➤ *Erreurs de calcul (étude)*

- Erreurs dans les hypothèses de calcul.
- Erreurs dans l'introduction des données dans un calcul automatique.
- Absence d'études.
- Mauvaise utilisation des règlements.
- Non vérification des états de service (déformations).
- Dessins incomplet ou insuffisant.(MAHOUZ and NOUARI, 2024)

➤ *Erreurs d'exécution et de réalisation*

- Dispositions défectueuses (notamment dispositions d'armatures) dans certains éléments ou dans la transmission des efforts (environ 2.5%).
- Désordres résultants de déformations excessives (soit 19.7%).
- Fautes d'exécution, surtout la confection des éléments en béton armé (15.5%) : Coffrage 2%, Bétonnage 4%, Ferrailage 7%, Décoffrage 0.5%, Causes multiples (généralement bétonnage et ferrailage défectueux) 1.5%.
- Fausses mains d'œuvre 1.5%.
- Désordres résultant des effets des variations dimensionnelles 43.7%.
- Mauvaise qualité du béton (une porosité très élevée) ce qui facilite la circulation des agents agressifs et l'eau.
- La ségrégation du béton due à la condition de transport du béton frais.(MAHOUZ and

NOUARI, 2024)

**I.2.3. Dégradation des matériaux**

➤ *La carbonatation*

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel qui concerne tous les bétons. Correspond à une transformation progressive d'essentiellement un des composés du béton durci, la portlandite, en calcite au contact du dioxyde de carbone contenu dans l'air et en présence d'humidité.

Dans le temps, le béton perd environ 50% de l'eau de gâchage qu'il contenait lors de la prise.

Cette perte d'eau crée un réseau capillaire à l'intérieur du béton qui favorise la pénétration du dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> présent dans l'air et alimenter une réaction chimique appelée :

Carbonatation	$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$
---------------	---

Une des conséquences principales de la carbonatation est de favoriser la corrosion des armatures. Elle se traduit la plupart du temps par l'apparition d'épaufrures laissant apparaître des armatures oxydées.

Pour protéger le béton contre la carbonatation il faut le confectionner a faible rapport E/C pour réduire la porosité du béton, et assurer un enrobage suffisant (qui peut être complète par enduit).(BOUACHRIA and KARI, 2021)

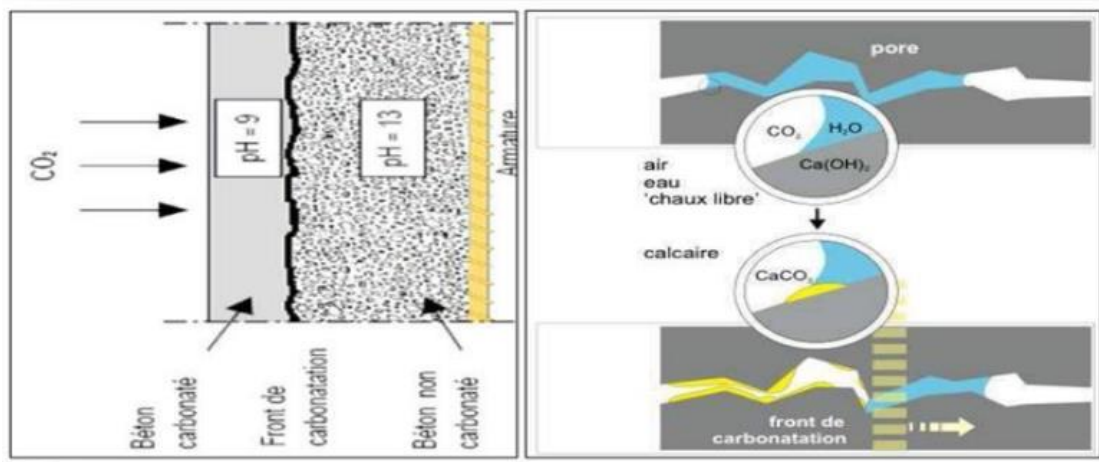


Figure I.1 : Processus général de la carbonatation( MAHOUZ and NOUARI, 2024)

➤ *Érosion*

Perte de matière résultant du frottement d'un corps solide et d'un fluide contenant des particules solides en suspension et en mouvement.(BOUACHRIA and KARI 2021)



*Figure.I.2: l'érosion du béton(BOUACHRIA and KARI, 2021)*

➤ *Abrasion*

Usure accompagnée d'une perte de matière consécutive au frottement d'un élément par un abrasif ou par le passage répétitif des piétons, véhicules et chariots industriels, etc.(BOUACHRIA and KARI , 2021)



*Figure.I.3: Désordre à la base des piles du pont sur Oued Allala (Ténès-Algérie) sous l'effet de l'abrasion.(BOUACHRIA and KARI, 2021)*

➤ *Chocs*

Le béton éclate sous l'effet de chocs produits par des engins de transport ou de levage, des outils.(BOUACHRIA and KARI , 2021)



*Figure.I.4: Grave conséquence de collision contre la pile d'un pont (d'un bateau).(BOUACHRIA and KARI , 2021)*



*Figure.I.5: Grave conséquence de collision contre la pile d'un pont (d'un véhicule)(BOUACHRIA and KARI , 2021)*

➤ *Cycle gel/ dégel*

Après un nombre important de cycles gel/dégel, certains bétons peuvent se déliter en surface et se désagréger. C'est le cas des ouvrages de montagne, des chambres froides.(BOUACHRIA and KARI , 2021)



Figure.I.6: Effet du gel-dégel sur le béton : écaillage du béton d'enrobage et corrosion des armatures. (BOUACHRIA and KARI , 2021)

➤ Réaction sulfatique

Ces réactions sont provoquées par l'action des sulfates provenant du milieu extérieur ou des granulats avec la chaux et les aluminates du ciment. Le produit final de ces réactions est l'ettringite secondaire dont le développement au sein du béton provoque une expansion qui altère les caractéristiques mécaniques du béton.(BENARBIA D, 2018)



Figure.I.7 : Attaque sulfatique (BOUACHRIA and KARI, 2021)

➤ Actions de l'eau de mer

Les effets de la mer sur le béton sont divers. De l'érosion, de l'usure peuvent tout d'abord se manifester sous les chocs répétés de graviers, de sables. Des cycles d'humidification et de séchage, de chaud et de froid peuvent ensuite se produire. Le béton subit alors des contraintes

de retrait et de gonflement hydrauliques. Enfin, l'eau de mer contient des sels qui vont avoir une action sur les ciments. Les éléments les plus dangereux sont les sulfates de magnésium et de calcium. Les désordres peuvent aller de la fissure à une dégradation complète du matériaux.(BENARBIA D, 2018)



*Figure.I.8: Altération d'un béton à la mer en zone de marnage(BOUACHRIA and KARI, 2021)*

➤*Tassement*

Des tassements différentiels des fondations peuvent entrainer une fissuration. Les mouvements d'appuis sont dus soit à des affouillements, soit à des glissements de terrain. Ils entrainent 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.(BENARBIA D, 2018)



*Figure.I.9: Tassement différentiel(BOUACHRIA and KARI, 2021)*

## ➤ 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.(BENARBIA, 2018)



*Figure.I.10: Séisme de Niigata 1964 Quartier Kawagishi-Cho(BOUACHRIA and KARI, 2021)*

### **I.3. Méthodes et technique de renforcement**

Plusieurs méthodes ont été évoluées pour la réparation ou/et le renforcement des ouvrages en béton armé. Elles peuvent être effectuées soit par ajout de force (précontrainte additionnelle) ou bien de matière (béton projeté, tôle d'acier, plaque en composite).(BENARBIA D, 2018)

Ces techniques de réparation peuvent être envisagées par deux méthodes Structurales et non structurales, selon l'importance du désordre.

- Réparations non structurales (légères) : Consistent en une reprise du béton dégradé par ragréage ou injection, utilisées dans le cas où le désordre est peu important. (BENARBIA D, 2018)

- **Réparations structurales (lourdes)** : Utilisées dans le cas où le désordre affecte la stabilité de l'ouvrage.(BENARBIA D, 2018)

### **I.3.1. Méthodes de réparation non structurales**

Des solutions de réparation graduelles peuvent être envisagées. Lorsque les désordres sont peu importants, des méthodes non structurales sont utilisées. Ces techniques de réparation dites « légères» consistent en une reprise du béton dégradé par ragréage ou injection. Le traitement du béton peut faire l'objet d'opération de ragréage par application de couches de peinture ou de mortier hydraulique après traitement de la poutre dégradée. La réparation par injection des fissures se fait bien évidemment à l'aide de produits aux caractéristiques bien défini et contrôlées, les conditions de mise en œuvre des produits de ragréage sont précisées dans la norme NFP95-101.(BADOURE,2018)

### **I.3.2. Méthodes de réparation structurales**

Les réparations et/ou renforcement structuraux des ouvrages en béton armé peuvent être effectués soit par ajout de forces (cas de la précontrainte additionnelle), soit par ajout de matière (béton projeté, adjonction d'armature complémentaire et renfort collés (plaques d'acier ou composites).(BADOURE, 2018)

#### **I.3.2.1. Réparation par béton projeté**

Cette technique, très au point, utilisée tant pour le renforcement de structures insuffisantes ou défaillantes que pour la réparation d'ouvrage endommagés, exige pour sa mise en œuvre un personnel spécialisé. Le béton peut être, ou non, combiné avec l'adjonction d'armatures complémentaires. Après durcissement, le béton projeté possède les propriétés d'un béton coulé, puis vibré. La projection est possible dans toutes les directions. La figureI.11 représente renforcement par béton projeté.(BADOURE, 2018)



Figure I.11: Béton projeté par voie humide(BADOUR, 2018)

Les réparations superficielles et les réparations profondes. Grâce à son adhérence au support, à ses caractéristiques très proches de celle du béton coffré, aux possibilités de mise en place et d'enrobage d'armatures de renfort qu'il procure, le béton projeté permet de réaliser économiquement de telles réparations. La difficulté de l'emploi de cette méthode provient essentiellement du mode d'application et de mise en œuvre (matériels, main d'œuvre et problème d'hygiène et de sécurité).(BADOUR, 2018)

### I.3.2.1. Réparation par adjonction d'armature complémentaire

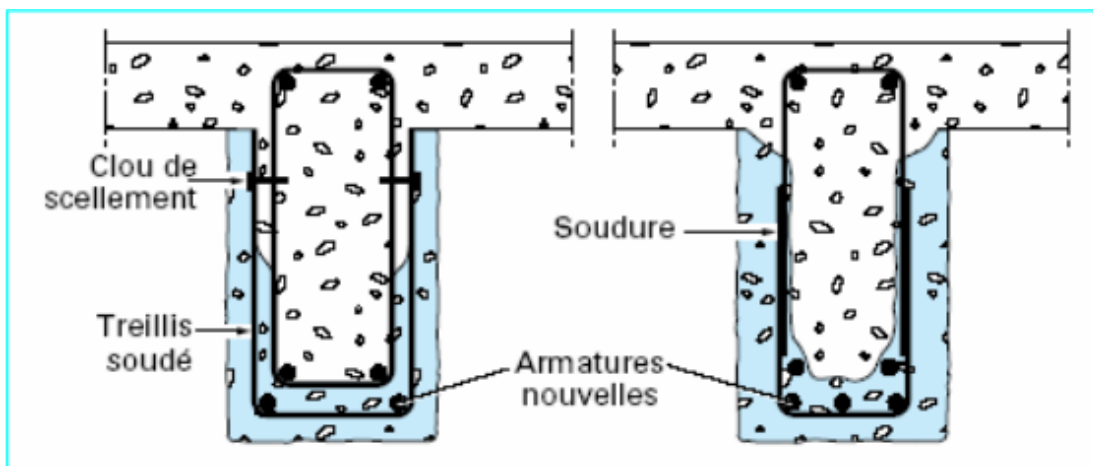


Figure I.12 : Réparation de poutre par adjonction d'armature(BADOUR, 2018)

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'il s'agit de remplacer des aciers corrodés ou coupé accidentellement ou lorsqu'il s'agit de renforcer une structure. Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration, et participer à la résistance des sections renforcées. La protection de ces armatures est assurée par un béton coulé ou projeté

et leurs jonctions avec les armatures existantes peuvent se faire par des procédés classiques (recouvrement, soudure, manchonnage ) (BADOUR, 2018).

### **I.1.3.2.3. La technique de précontrainte additionnelle**

Cette technique consiste à mettre en œuvre une précontrainte (câbles, barres ou torons) dans un ouvrage pour en améliorer la résistance d'ensemble vis-à-vis de la flexion et/ou de l'effort tranchant. Cette dernière permet la mise en œuvre et la conservation d'efforts de précontrainte appliqués à des ouvrages existants dans le but de leur redonner leur état de service ou de leur donner un nouvel état de service Cette méthode de renforcement bien que très efficace présente quelques difficultés de mise en œuvre d'après .En effet, elle nécessite de dimensionner soigneusement des ancrages et des forages à travers certaines parties de la structure existante sont nécessaires.(AMEUR, 2009).



*Figure I.13 : La technique de précontrainte additionnelle (BADOUR, 2018)*

### **I.3.2.4 Réparation par collage de plats métalliques**

Cette méthode repose sur la liaison entre une plaque d'acier et la surface du béton afin de transférer les charges et d'accroître la résistance et la rigidité de la structure. Elle est réputée pour son économie et ne modifie pas la forme ni les dimensions de la structure.( MAHOUZ and NOUARI, 2024).



*Figure I.14: renforcement par collage de plats métalliques (BADOUR, 2018)*

#### **1.4. 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.

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 D, 2018)

#### **I.4.1. Utilisation des composites dans le génie civil**

Dans le génie civil, l'utilisation des matériaux composites occupe une grande part de plus en plus importante par rapport aux autres secteurs grâce à leurs propriétés avantageuses telles que la légèreté, la rigidité et la résistance spécifiques, la résistance à la fatigue et à la corrosion.

En général, la technique d'utilisation des matériaux composites peut être utilisée pour améliorer la ductilité ainsi que d'autres propriétés.

#### **1.4.2. Remplacement des tôles métalliques par des matériaux composites**

Dans le domaine du génie civil, une transition s'est opérée après la période allant de 1960 à 1990. La construction intensive d'ouvrages d'art, de grands immeubles et d'installations industrielles a cédé la place à une phase de consolidation, caractérisée par des opérations de maintenance. Ces opérations se concentrent souvent sur le renforcement des structures, que ce soit pour des réparations suite à des désordres ou pour se conformer à des normes de plus en plus strictes. De nombreux exemples de telles interventions existent. Jusqu'à présent, l'une des méthodes de renforcement les plus répandues dans le monde est le collage externe de plaques métalliques, selon le procédé L'Hermite, en raison des avantages qu'il offre.

- il n'exige que des interventions mineures sur la structure.
- il est d'un emploi souple
- les renforts sont peu encombrants ;

Toutefois, le collage de tôles métalliques présente aussi quelques difficultés :

- L'acier est sensible à l'oxydation, ce qui signifie qu'il nécessite une protection et un entretien attentif.
- Même sous une faible épaisseur, les tôles ne peuvent pas exploiter pleinement leur résistance en traction lorsqu'elles sont sollicitées le long d'une seule face.

- En raison de la raideur des tôles, une préparation spécifique de la surface à traiter est nécessaire pour garantir une surface parfaitement plane, assurant ainsi une uniformité de l'épaisseur de l'adhésif.
- Un collage sous pression, généralement réalisé à l'aide de vérins, est nécessaire pour garantir une adhérence suffisante et pour prévenir la formation de bulles d'air dans la couche de résine de collage.
- La manipulation des plaques sur le chantier est compliquée en raison de leur grande taille lors de la mise en place. De plus, les longueurs des tôles sont limitées, ce qui nécessite la création de
- Joints entre deux plaques successives pour des portées trop importantes.

Ces défis, combinés aux besoins de renforcement des bâtiments dans les zones à risque sismique, ont encouragé la recherche et le développement de l'utilisation de matériaux composites à base de fibres de carbone pour renforcer ou réparer les structures du génie civil. Bien que la réparation par tôle soit souvent efficace et éprouvée, il est pertinent de proposer une alternative dans les cas où des conditions environnementales difficiles ou des problèmes de mise en œuvre pourraient compromettre son efficacité. (MAHOUZ and NOUARI, 2024)

#### **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 inférieure 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 structurale 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.(BOUACHRIA and KARI, 2021)

- Réparation de pont, renforcement structural

Bandes de polymères renforcés de fibres de carbone (PRC) pour le renforcement des ouvrages de construction. Ces fibres peuvent produire une haute résistance capable de soutenir la structure en béton.(MAHOUZ and NOUARI, 2024)



*Figure I.15: renforcement en fibres de carbone( MAHOUZ and NOUARI, 2024)*

- Mise en oeuvre

Dans le cas de renfort en lamelle de fibre de carbone, en général on applique l'adhésif époxy en couche de 1 mm sur la surface déjà préparée ainsi que sur la face supérieure des lamelles, préalablement traitées en usine pour avoir la rugosité adéquate, et qui doivent également être propres.

Dans le délai du temps d'application de la résine époxy, les lamelles seront posées à l'aide d'un rouleau pour exercer une pression. L'excédent de résine doit être nettoyé.

Il est recommandé d'ancrer les lamelles dans un béton sain et de disposer de la longueur nécessaire.

- Préparation de la surface du béton

La surface du béton doit être bien préparée afin d'éviter la rupture à l'interface résine béton par suivre un procédé adéquat.

Une bonne préparation extérieure du béton exige une importante maintenance, et que les surfaces de béton irrégulier sont réglés.

- Préparation du support

Elle consiste au sablage, on prépare la structure à recevoir le renforcement et assurer l'adhérence entre les différents matériaux.



*Figure I.16: Décapage*

- Nettoyage et brossage des surfaces qui peuvent être humides



*Figure I.17: Brossage de l'élément*

- Préparation des fissures par injection de la résine de réparation



*Figure I.18: Injection de la résine*

- Préparation de la surface du renfort

Pour les plaques de composites, la rupture peut se produire aussi à l'interface de composite résine si la surface de la plaque de carbone n'est pas correctement préparé (par exemple déplacement inadéquat, des impuretés comme par exemple : graisse sur la surface).(MOHAMED MAHOUZ and NOUARI SID AHMED, 2024)



*Figure I.19: lissage de la surface de renforcement*

- Pour les tissus



*Figure I.20: Découpage de la tissu*

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



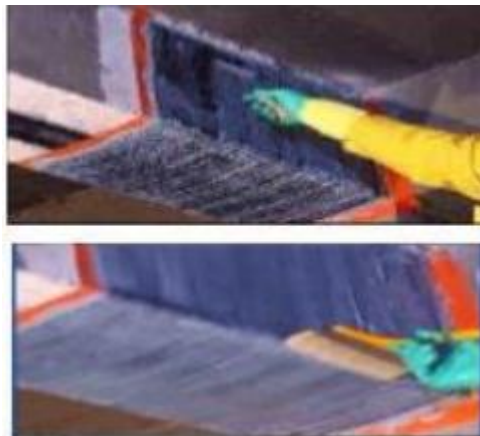
*Figure I.21: Application et accrochage*

- Mise en place de la bande ou du tissu



*Figure I.22: Enroulement par les fibres*

- Application au rouleau, d'une couche de résine d'accrochage sur la surface extérieure



*Figure I.23: Application de la couche d'accrochage*

- Renfort éventuel de la fixation des extrémités par mise en œuvre de chevilles TFC.
- Passage de la bande dans l'imprégnateur.
- Passage rouleau du maroufler imprégnateur.

## **I.5.Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons étudié les problèmes que peut rencontrer le béton armé, ainsi que les méthodes utilisées pour réparer.

Avec le temps, le béton se détériore à cause de la perte de ses qualités mécaniques, physiques et chimiques. Ces dégradations peuvent avoir différentes causes et rendent le béton moins efficace.

Avant de réparer, il est très important de bien comprendre d'où viennent les problèmes, de trouver des solutions adaptées, puis de choisir les bons produits pour faire la réparation. Un bon diagnostic est donc essentiel avant toute intervention.

Quelle que soit la méthode utilisée, le but est de redonner au béton et à l'acier leur solidité d'origine, ou de remplacer les parties abîmées par d'autres matériaux. L'objectif final est que la structure puisse à nouveau supporter les charges, voire même en supporter plus si nécessaire, pour répondre aux attentes des utilisateurs ou des propriétaires.

## *Chapitre II*

# *Matériaux composites*

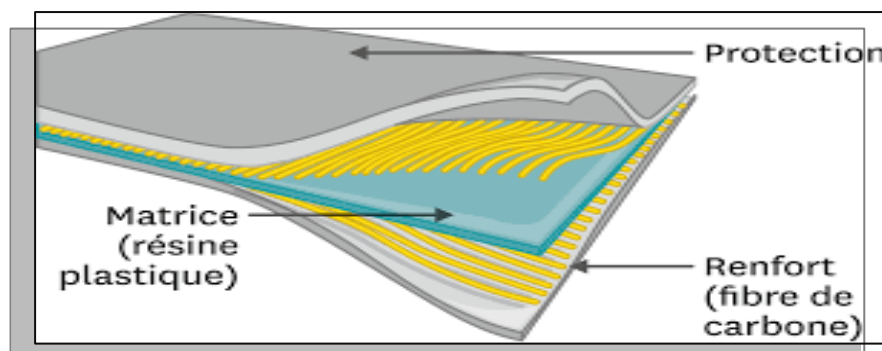
## II.1 Introduction

Au cours de ces dernières années, l'industrie de la transformation des matériaux composites a bénéficié d'une croissance rapide et régulière, soutenue en particulier par la diversité des applications puisque les composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes,...etc. Ils enrichissent les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions, aussi, ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements et/ou structures grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ce chapitre a pour objectif de définir le concept de matériau composite, connaître sa composition, ses propriétés et de classer ces différents structures.

*Qu'est-ce qu'un matériau composite ?*

Un matériau composite est formé par l'association de deux composants principaux : les fibres, qui assurent le renforcement et les propriétés mécaniques du matériau, et la matrice, qui les entoure et assure le maintien des fibres dans une structure cohésive.

Il est possible de moduler les comportements mécaniques et physiques en modifiant les éléments suivants : la nature des composants, la proportion des composants et l'orientation des fibres.(AMRANI and MEDJADJI, 2023).



*Figure II.1 : Exemple d'un matériau composite. (AMRANI and MEDJADJI, 2023).*

## II.2. Le renfort

Le renfort est le squelette supportant les efforts mécaniques. Son rôle principal est d'assurer la résistance mécanique du matériau composite. Il se présente sous plusieurs formes : fibres courtes (mat) ou fibres continues (tissus ou textures multidirectionnelles) en fonction de l'usage et la fonction envisagée. Les fibres présentent une bonne résistance à la traction

mais une résistance à la compression faible. Les renforts fibreux peuvent être continus: Unidirectionnels(UD), Tissus...et discontinus: Mats, Feutres ...Leur nature peut être : Verre E ou R, Aramide, Carbone, Bore, Carbure de silicium. Parmi les fibres les plus utilisés (figure I.2), on peut citer :

- ✓ Fibres de verre;
- ✓ Fibres de carbone;
- ✓ Fibres de kevlar (d'aramide).(Ghabi, 2018)

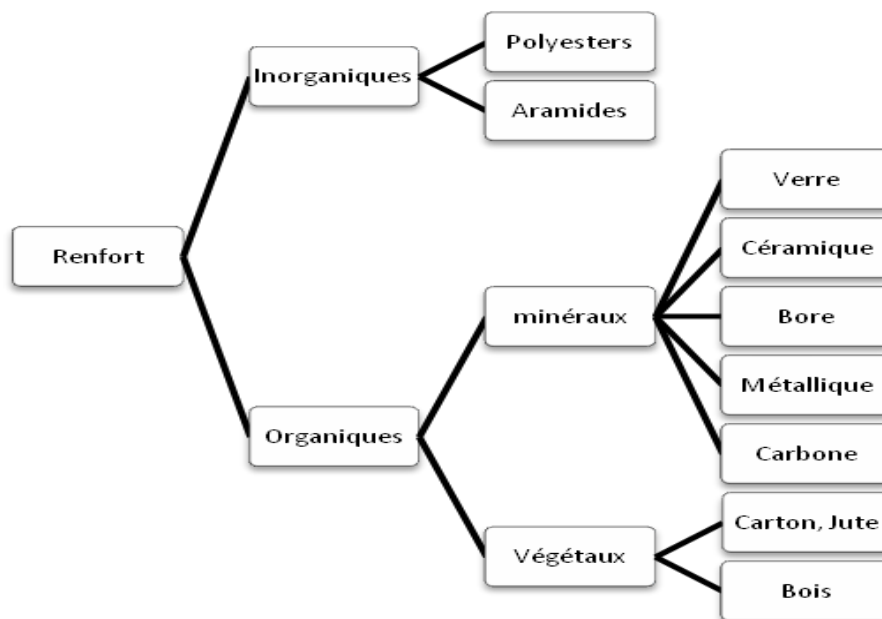


Figure II.2: La classification des types de renforts. (SAFAR and TOUATI, 2024)

## II.2.1. Revue des différents renforts disponibles

### II.2.1.1. Les fibres de carbone :

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances en aéronautique, en construction industrielle, dans les sports et les loisirs. Très fortement orientées, les microstructures des fibres de carbone donnent une importante rigidité et résistance des fibres dans la direction longitudinale que dans la direction transversale.(SAFAR Djamila and TOUATI Saliha, 2024)

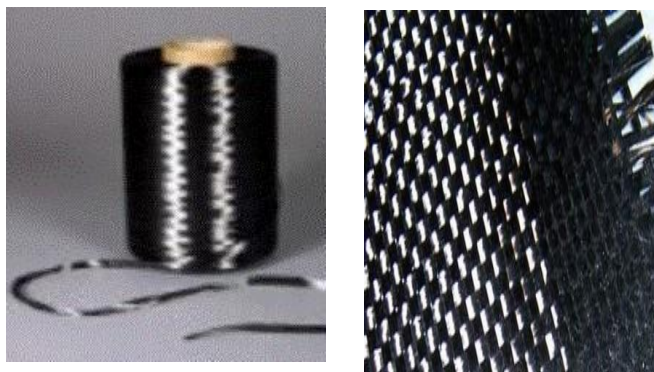
#### ❖ *Avantages des fibres de carbone*

- Excellentes propriétés mécaniques.
- Très bonne tenue en température (non oxydante).

- Dilatation thermique nulle.
- Bonne conductibilité thermique et électrique.
- Bonne tenue à l'humidité.
- Usinage aisé.
- Faible densité.(SAFAR and TOUATI, 2024)

#### ❖ Inconvénients des fibres de carbone

- Une mauvaise résistance à l'abrasion et aux chocs.
- Leur recyclage (broyage problématique).
- Leur conductivité, de nombreuses électrocutions ont frappé des pêcheurs après avoir heurté une ligne électrique avec leur canne ou des marins en manœuvrant le mât de leur voilier.
- Cette fibre provoquerait sous certaines formes des risques de cancer du poumon.



*Figure II.3: Exemples des fibres de carbone.(SAFAR and TOUATI, 2024)*

#### II.2.1.2. Les fibres de Kevlar

Le mot aramide vient de la contraction d'Aromatique-polyamide. Les fibres d'aramide sont constituées de filaments jaunes continus d'un diamètre de l'ordre de 12  $\mu\text{m}$  assemblés en fils (figure I.6). Elles sont des fibres synthétiques qui résistent bien chaleur et ont de bonnes propriétés mécaniques. Elles sont utilisées dans les protections balistiques comme la confection de gilets pare- balles. (Berthelot J.M., 2002)

Il existe trois types de fibres Kevlar :

- ✓ Fibres Kevlar 29(BM : à bas module d'élasticité) ;
- ✓ Fibres Kevlar 49(HM : à haut module d'élasticité) ;

- ✓ Fibres Kevlar 149(UHM : à ultra-haut module d'élasticité).
- Les propriétés physiques et mécaniques de ces deux types de fibres sont représentées dans le tableau I.2.

Propriétés en traction	Kevlar 49	Kevlar 29
$R_T$ (MPa)	3000	2700
$E_{0T}$ (MPa)	120000 à 130000	60000
$A_R$ (%)	2.1	4
Masse volumique (g / $cm^3$ )	1.45	1.44

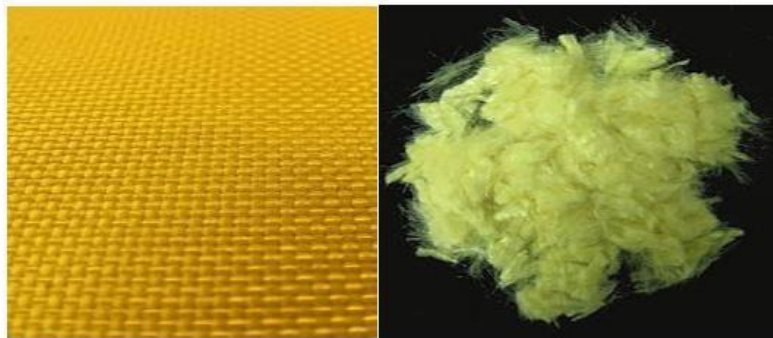


Figure II.4: Fibre d'Aramide (kevlar). (BOUACHRIA and KARI, 2021)

### II.2.1.3. Les fibres de verre

Le renfort assure la résistance aux sollicitations et contribue à l'amélioration de la rigidité de la structure. Le verre, en forme massive, se caractérise par une fragilité très élevée due principalement à sa sensibilité à la fissuration. Lorsque le verre est sous forme de fibre, cette fragilité diminue du fait que les microfissures sont beaucoup moins nombreuses, ce qui lui accorde de bonnes performances au niveau de la résistance à la rupture.

Il existe plusieurs types de verres : les verres A, D, E, R et S, qui diffèrent en propriétés selon la composition du mélange.

Le type E est employé pour les fibres de verre constituant le renfort du matériau composite faisant l'objet de ce travail. Ce dernier présente un comportement de type élastique fragile. (BOUACHRIA and KARI, 2021)

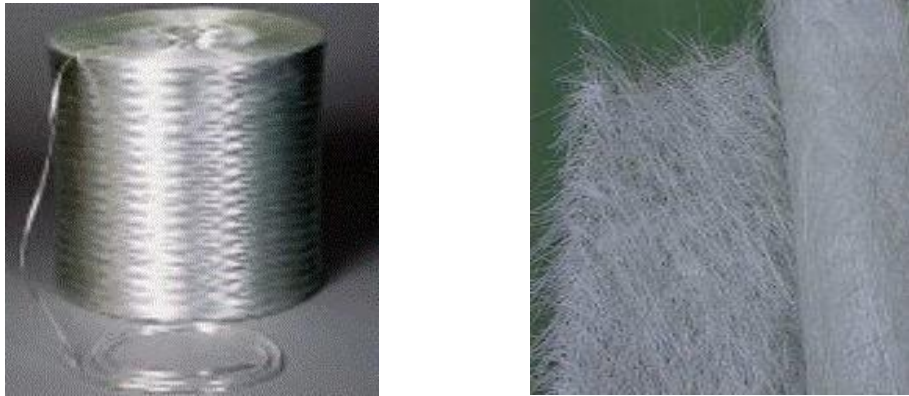
#### ❖ **Avantage des fibres de verre**

-Excellente adhérence.

- Bon rapport de performances.
- Mécanique/prix.
- Bonne propriété diélectrique.
- Tenue en température élevée.
- Incombustibilité.
- Dilatation thermique faible.

#### ❖ Inconvénients des fibres de verre

- Faible module.
- Vieillessement au contact de l'eau. (BOUACHRIA and KARI, 2021)



*Figure II. 5: fibre de verre (SAFAR and TOUATI, 2024)*

## II.3. La matrice

### II.3.1. Notion sur les matrices

Le rôle de la matrice est de lier les fibres du renfort entre eux, les incorpore et leur donner une adhérence suffisante pour que la transmission des efforts et la répartition des contraintes soient assurées. C'est comme "l'emballage". Elle assure également une protection chimique ou contre la corrosion par exemple. (Berthelot J.M., 2002)

On peut retrouver dans l'organigramme ci-dessous, les différentes familles de matrices:

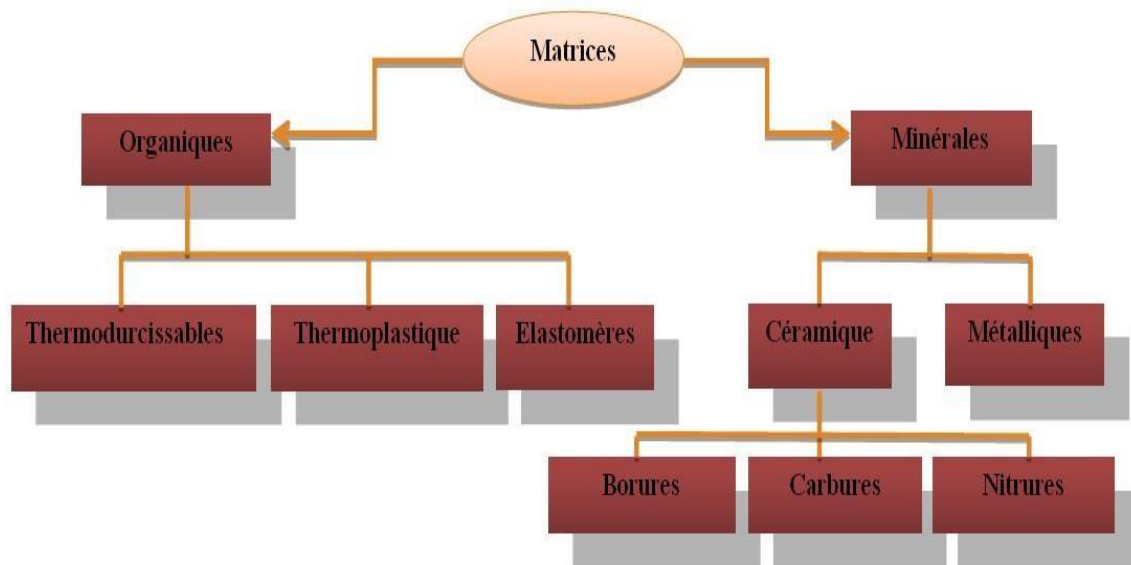


Figure.II.4: Les différentes familles de Matrice. (BOUACHRIA and KARI, 2021)

### II.3.1.1. Les matrices organiques

Les matériaux composites peuvent être fabriqués à partir de matrices composées de divers matériaux polymères. Les substances composées. Les familles de résines "thermodurcissables" ou "thermoplastiques" peuvent les contenir. Résines "thermodurcissables" et "thermoplastiques". (SAFAR and TOUATI, 2024)

### II.3.1.2. Résines thermodurcissables (TD)

Les structures moléculaires de cette classe sont beaucoup plus complexes et difficiles à représenter par un simple croquis. Elles constituent un réseau tridimensionnel de thèmes fondamentaux. Les plus courantes sont les aminoplastes, les polyamides, les phénoliques, les polyesters et les époxydes. Ils sont créés par l'interaction chimique d'une résine de base avec son catalyseur ou durcisseur, plus une variété d'autres substances (telles que les accélérateurs et les inhibiteurs) qui ajoutent des qualités uniques à la fois au matériau et à la réaction chimique (charges). Une fois durci, le matériau ne peut pas être fondu ; il ne peut être qu'usiné. (SAFAR and TOUATI, 2024)

### II.3.1.3. 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)

### **II.3.2.1. Les matrice métallique**

Une matrice métallique présente les avantages suivants par rapport à une matrice organique:

- Qualités mécaniques accrues ne plus grande plage de températures de travail une excellente conductivité électrique et thermique (dissipation de la chaleur) Simplicité d'assemblage et d'usinage.
- Il convient de mentionner que les matrices métalliques restent plus chères que les matrices organiques. Les matrices métalliques sont fabriquées par diverses méthodes, notamment le dépôt physique en phase vapeur, l'imprégnation en phase liquide et la stratification. (SAFAR and TOUATI, 2024)

## **II.4. L'adhésif**

Les colles, quel que soit leur état (liquide, pâte ou bien film) sont constituées de polymères organiques et appartiennent à l'une des trois catégories suivantes :

- Les thermodurcissables, dont le réseau polymère possède une structure tridimensionnelle. Ils présentent une rigidité élevée et de très bonnes propriétés mécaniques.
- Les thermoplastiques, constitués de chaînes linéaires, qui présentent en général des propriétés mécaniques inférieures à celles des thermodurcissables, Les élastomères, très souples et peu résistants, mais qui présentent une très forte



*Figure.II.5:préparation de la colle(BOUACHRIA and KARI, 2021)*

## **II.5. Propriétés mécaniques des composite**

Les propriétés mécaniques du composite varient selon la matrice, les fibres utilisées, de leur distribution et de leur direction. Les composites contiennent en général entre 30 et 60% de fibres. Les fibres peuvent être disposées toutes dans le même sens ou selon un quadrillage particulier ; désigné comme composite unidirectionnel ou multidirectionnel. Dans les expériences, un tissu de fibres de carbone bidirectionnel également appelé maillage à 90° sera utilisé.(AMRANI and MEDJADJI, 2023). Dans le cas d'un composite unidirectionnel, la résistance à la traction est supérieure dans la directiondes fibres que dans la direction perpendiculaire. Il est donc primordial de placer le CFRP dans le sens adéquat.(AMRANI and MEDJADJI, 2023).

## **II.6. Application des matériaux composites**

### **II.6.1. Les composites dans la construction civile**

L'utilisation des composites dans la construction civile est un nouveau créneau, qui commence à intéresser nos bâtisseurs. Le nombre de dégâts causés par les séismes à travers le monde a poussé les chercheurs à s'intéresser aux composites. Le handicap majeur de l'utilisation des matériaux composites dans la construction civile, reste leur coût, qui est encore excessif. L'utilisation des composites renforcés de fibres de carbone, en complément des composites à fibre de verre (TD et TP) pourra se développer dans le secteur de la construction civile lorsque leur prix deviendra inférieur à 6€/kg.

Les composites apportent au bâtiment la souplesse des formes, la résistance aux contraintes climatiques, et les composites renforcés de fibres de carbone la résistance aux séismes. L'utilisation des composites dans le bâtiment ne pourra se développer que si les

prescriptions techniques actuelles sont mieux adaptées à leur spécificité. (**Berthelot J.M., 2002**).

### **II.6.2. Construction automobile**

L'utilisation des composites dans le secteur automobile remonte à des origines relativement anciennes (fin des années 1980), mais ne s'est généralisé que très récemment, chez les grands constructeurs étrangers (Volvo, Mercedes) pour développer des coffres et hayons. (SEGHOUANE and RAHO, 2023)

### **II.6.3. La construction des navires en matériaux composites**

Les matériaux composites modernes permettent la construction en série de bateaux, et donc l'abaissement des coûts de production. Ce type de construction actuelle est réalisé à partir d'un moule sur lequel on superpose des couches de fibre de verre et de résine. Ils comprennent le ferrociment, le polyester stratifié, les plastiques, les sandwichs. Pour les bateaux de course, on remplace la fibre de verre par de la fibre de carbone, plus résistante. (SEGHOUANE and RAHO, 2023)



*Figure II.6: Construction des navires en matériaux composites. (SEGHOUANE and RAHO, 2023)*

### **II.6.4. Les composites dans le secteur médical**

Composites TD et TP ont investi récemment le secteur médical et de la sécurité, comme ils ont investi auparavant les autres secteurs. Il s'agit surtout des composites hautes performances, à matrice époxy et fibres de carbone, ou à matrice thermoplastique et fibres

longues de verre ou de carbone d'autre part. L'utilisation des composites permet d'augmenter la fiabilité et la précision des instruments grâce à une meilleure résistance aux chocs, une grande rigidité et une bonne résistance à la corrosion.

## II.7. Utilisation des composites <<FRP>>en génie civil

Les composites FRP sont durables et légers et peuvent donc répondre à de nombreuses exigences des matériaux de construction pour le génie civil. De plus, la facilité d'utilisation et les propriétés mécaniques que les matériaux en FRP offrent par rapport aux autres matériaux conventionnels, leur grande variété de types, de formes et de propriétés leur permet d'être utilisés efficacement dans plusieurs types d'applications en génie civil et en construction telles que les structures BA réparées.



(a)



(b)



(c)

*Figure II.7 : Applications des FRP en génie civil, a) Pont de l'Autoroute 55 Nord (Magog – 2002), b) Pont Wotton (Municipalité de Wotton – 2001), (c) le renforcement d'une poutre par lamelles en FRPC.*

## **II.8. Influence de l'environnement sur le comportement des composites**

### **II.8.1. La température**

Vis-à-vis de la température, les performances des matériaux composites sont principalement conditionnées par l'adhésif. En revanche, pour une température basse, les performances sont conditionnées par la matrice. En cas d'incendie, le renforcement par collage extérieur par matériaux composite doit être protégé par une technique d'isolation.

### **II.8.2. L'humidité**

La résine de la matrice absorbe l'eau. La quantité d'eau absorbée dépend du type de résine et de la température de l'eau, donc le comportement réduit. (Ghabi Asmaa, 2018)

### **II.8.3. Fluage et corrosion sous contrainte**

Le fluage des composites à fibres de carbone n'est pas un facteur déterminant pour le dimensionnement du renforcement d'éléments structuraux, car les structures renforcées ont généralement déjà subi leur propre fluage.

L'atmosphère ou l'environnement ambiant est en général insuffisant pour causer une corrosion du composite. Néanmoins, il peut y avoir corrosion lorsque le composite est soumis à un certain niveau de contrainte : c'est la corrosion sous contrainte. Ce phénomène est dépendant du temps, du niveau de contrainte, du type de matrice et de fibres. Les fibres de carbone ne sont que très légèrement affectées, lorsque le niveau de contrainte reste inférieur à 80 % de la résistance ultime : les niveaux de sollicitations réels des composites en place sont tels que les risques sont très limités. (Ghabi Asmaa, 2018)

## **II.9. Conclusion**

Les matériaux composites représentent une classe de matériaux innovants qui allient les propriétés complémentaires de leurs constituants matrice et renfort - pour offrir des performances mécaniques, thermiques et chimiques supérieures à celles des matériaux traditionnels. Leur légèreté, leur résistance élevée et leur adaptabilité les rendent indispensables dans des domaines variés tels que l'aéronautique, l'automobile, le bâtiment ou encore le sport. Ce chapitre a permis de poser les bases nécessaires à la compréhension de leur composition, de leurs caractéristiques, ainsi que de leurs principaux procédés de fabrication.

## *Chapitre III*

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

### III.1. Introduction

L'utilisation des matériaux composite pour le renforcement concerne des éléments soumis à la flexion, dans le but d'améliorer leur capacité portante en termes de flèche et/ou d'effort tranchant. Cette technique consiste à appliquer des plaques composites sur la face inférieure tendue d'une poutre en béton, afin d'en renforcer la structure. L'adhérence de ces lamelles ou plaques composites à la surface du béton armé entraîne une modification notable du comportement structurel par rapport à une structure non renforcée.

Ce chapitre a pour objectif d'analyser le comportement mécanique des poutres non renforcées, puis d'étudier plus en détail celui des poutres renforcées, en mettant l'accent sur les mécanismes de rupture et de décollement du renfort. Une attention particulière sera portée à la zone d'interaction entre le béton et le matériau composite, appelée interface, ainsi qu'aux différentes théories de transfert permettant de modéliser les contraintes à cette interface.

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

L'utilisation du collage est la méthode privilégiée pour fixer les matériaux composites sur une surface en béton. Cette méthode permet une répartition uniforme des contraintes et nécessite des équipements légers. Cependant, bien que largement adoptées dans l'aéronautique ou l'automobile, les techniques de fixation par collage ont du mal à s'imposer dans le domaine du génie civil, qui a une préférence pour les connexions mécaniques par clouage ou vissage.

Malgré cela, la fixation des renforts en matériaux composites par collage demeure une méthode efficace. Toutefois, il est observé que la défaillance des systèmes collés survient principalement par décollement des composites, ce qui peut entraîner une rupture fragile. Cela est particulièrement préoccupant dans le contexte d'un renforcement parasismique, où la ductilité de l'élément est essentielle pour dissiper l'énergie sismique.

Ainsi, l'optimisation du renforcement par matériaux composites collés en incluant des systèmes d'ancrage peut être une approche constructive intéressante. En particulier, la jonction entre deux éléments est souvent une zone critique ; il est donc crucial d'assurer une certaine continuité du système de renforcement entre ces deux éléments. (Bouabdellah,2023)

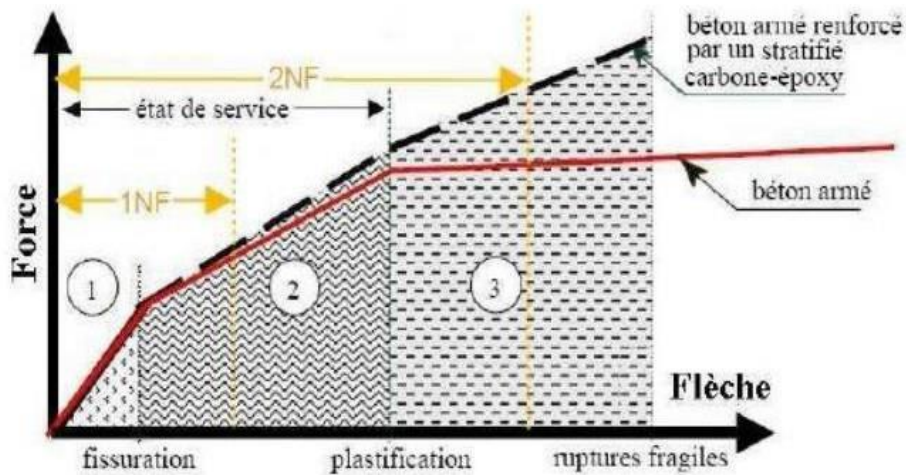


Figure III.1 : Les trois phases de comportement d'une poutre en béton armé fléchie renforcée par un stratifié en composite. (Bouabdellah,2023)

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

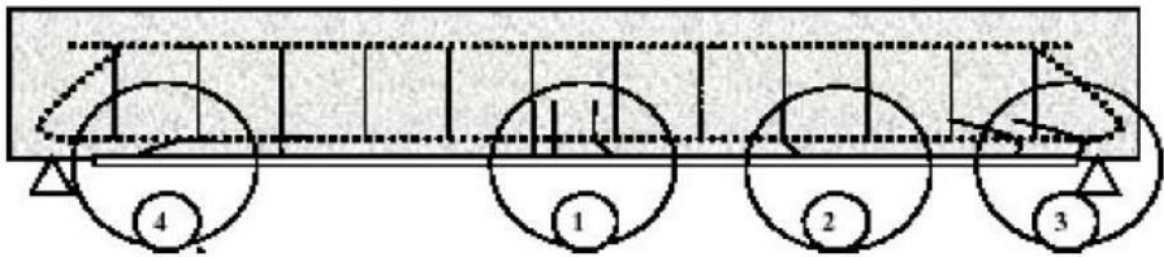


Figure III.2 : comportement structural d'une poutre renforcée. (Bouabdellah,2023)

Nous allons décrire plus en détail le comportement mécanique de chaque section (section centrale, intermédiaire et d'extrémité).

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

La section intermédiaire (2) : Dans cette partie, les contraintes de cisaillement ne sont pas négligeables. Deux facteurs peuvent donc altérer l'équilibre de la section : les propriétés mécaniques et géométriques du joint de colle (module et épaisseur) et l'intensité des contraintes. Pour la section, les interactions de ces paramètres entraînent une diminution des efforts dans le composite. Cette diminution des efforts conduit alors à une redistribution des charges dans la section vers les armatures en acier.

La section d'extrémités (3 et 4) : Cette partie est exposée à un couple d'efforts tel que défini par plusieurs chercheurs, qui ont mis en évidence la présence de contraintes excessives à l'extrémité et une sur-contrainte normale localisée à l'extrémité de la plaque. La présence de ces sur-contraintes localisées influence notamment le mode de rupture. Deux scénarios 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. (Bouabdellah,2023)

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

Dans le cas de poutres renforcées soumises à des sollicitations de flexion, quatre modes de rupture sont fréquemment observés dans les études expérimentales : la rupture due à la flexion, la rupture due à l'effort tranchant, la rupture due au décollement du tissu et la rupture de l'enrobage du béton (voir Figure III.3). (Bouabdellah,2023)

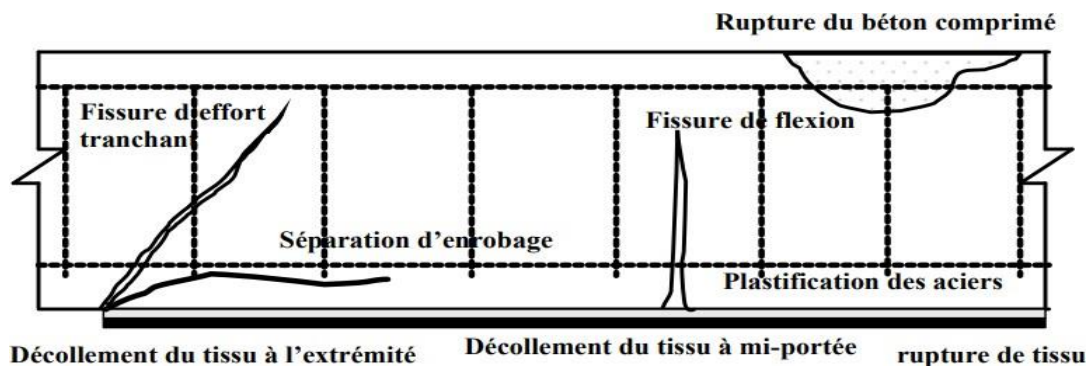


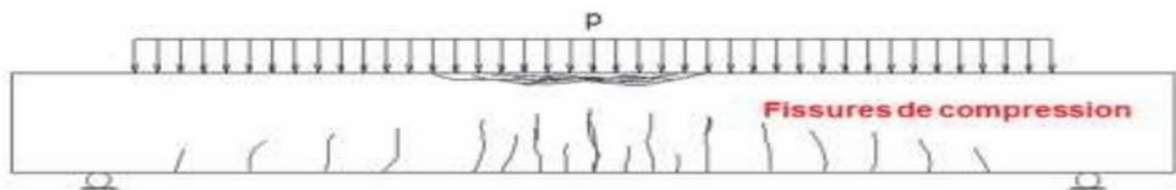
Figure III.3 : Modes de rupture des poutres renforcées de matériaux composite (Bouabdellah,2023)

#### III.3.1. Rupture due à la flexion

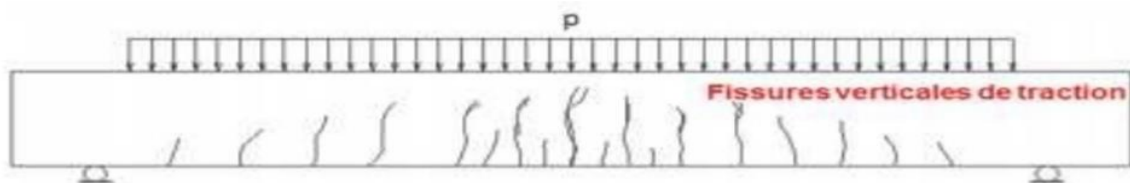
Les modes de rupture en flexion des poutres en béton armé renforcées par une plaque en composite se manifestent soit par la rupture du composite, une plastification significative des armatures tendues, ou encore par l'écrasement du béton en compression. (Bouabdellah,2023)



Figure III.4 : Essai flexion 4point sur une poutre BA renforcée avant et après la rupture par peeling-off. (Boulaziz A.2014)



(a)



(b)

Figure III.5 : Mode de rupture (a) Rupture en flexion (avec une compression de béton) ; (b) Rupture en flexion (Boulaziz A.2014)

### III.3.2. Rupture due au cisaillement

La rupture par effort tranchant des poutres survient lorsque la résistance au cisaillement des poutres non renforcées est insuffisante. Les fissures se forment initialement aux extrémités de la plaque longitudinale et se propagent en direction du centre de la poutre. Cette situation découle de la concentration des contraintes résultant de la discontinuité du tissu.

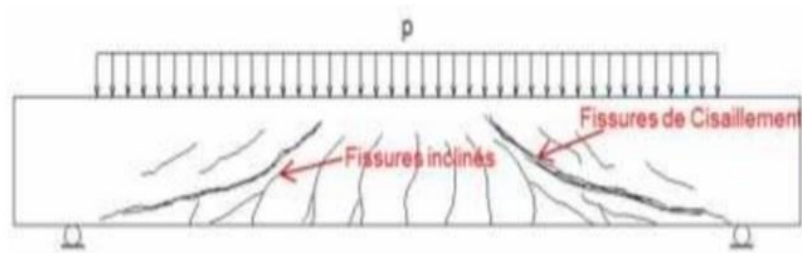


Figure III.6 : Rupture en cisaillement. (Boulaziz A.2014)

### III.3.3. Rupture due au décollement

Ce mécanisme de rupture se produit à cause de la concentration élevée des contraintes dans l'interface colle/béton. La différence réside dans l'origine de ces contraintes. La propagation de fissures dues à la combinaison des efforts tranchants et du moment fléchissant engendre d'importante déformation du tissu composite. Ce mécanisme de ruine est décrit par les raisons suivantes :

- Séparation du béton d'enrobage.
- Décollement de tissu à l'extrémité.

Le décollement à mi- portée se produit sous les conditions suivantes :

- Les appuis sont rapprochés des extrémités du tissu FRP.
- Une portée importante de l'effort tranchant, c'est-à-dire, que la résistance à l'effort tranchant aux extrémités est très supérieure la résistance du moment fléchissant, donc des fissures dues au moment de flexion élevé se produisent proche de la mi- portée. Une faible épaisseur du tissu FRP. (Boulaziz A.2014)



Figure III.7 : Rupture d'une poutre renforcée par décollement du renfort (BOUACHRIA and KARI, 2021)

Les différents modes de rupture d'une poutre BA renforcée sont montrés sur cette figure :

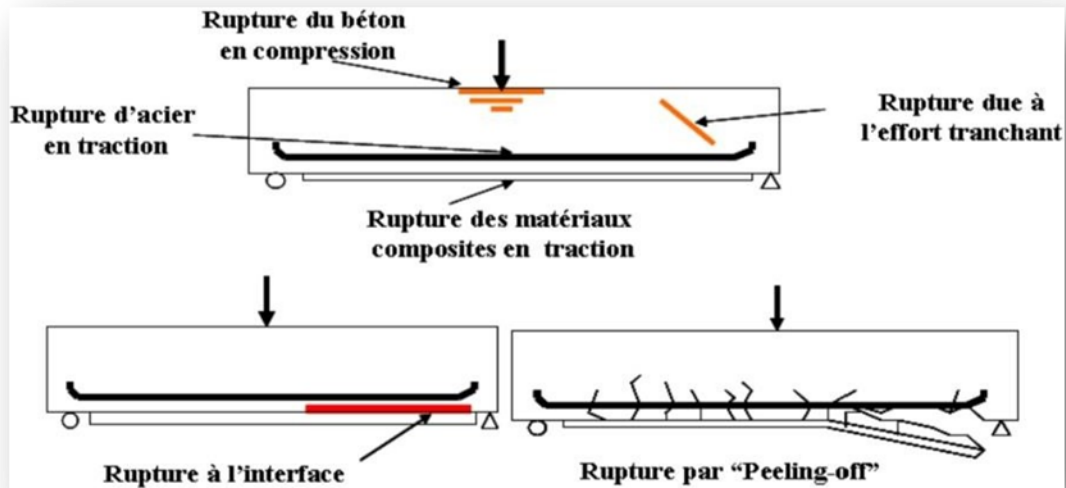


Figure III.8 : Différents modes de rupture (BOUACHRIA and KARI, 2021)

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

Les poutres en béton armé renforcées par des matériaux composites sont composées de quatre éléments : le béton, les armatures, la colle et le tissu. Le béton présente des comportements distincts en traction et en compression. Les armatures adoptent un comportement élasto-plastique.

La colle assure le transfert des contraintes de cisaillement entre le béton et le composite. Des modifications dans les caractéristiques ou la quantité de chacun de ces quatre matériaux, telles que la résistance du béton, le taux de renforcement des armatures tendues, les différents types de tissu, ainsi que l'épaisseur de la colle ou du tissu, peuvent influencer la réponse des structures renforcées. De plus, des paramètres géométriques tels que la proportion de la distance entre la charge et l'appui par rapport à la hauteur de la poutre, ainsi que la longueur du tissu, exercent également un impact sur le comportement des structures renforcées. (MAHOUZ and NOUARI)

### **III.5. Conclusion**

La technique des plaques collées en matériaux composites acquiert une importance croissante dans le domaine du renforcement des structures. Elle s'avère notamment intéressante pour le renforcement et la réparation des structures en béton armé. La présence de matériaux composites sur les surfaces tendues améliore considérablement la résistance ultime et la raideur structurale de poutres renforcées en diminuant la propagation de fissures, particulièrement en cas d'une poutre faiblement ou moyennement armée en partie tendue.

Ce chapitre aborde le comportement des poutres en béton armé soumises à des charges statiques, ainsi que les divers modes et mécanismes de rupture des poutres renforcées par des composites dans les mêmes conditions. De plus, il examine les facteurs qui influent sur le comportement de ces poutres renforcées.

## Chapitre IV

*Modélisation des contraintes de  
cisaillement et normales d'une  
poutre en béton armé poreuse  
endommagée réparé par matériaux  
composites*

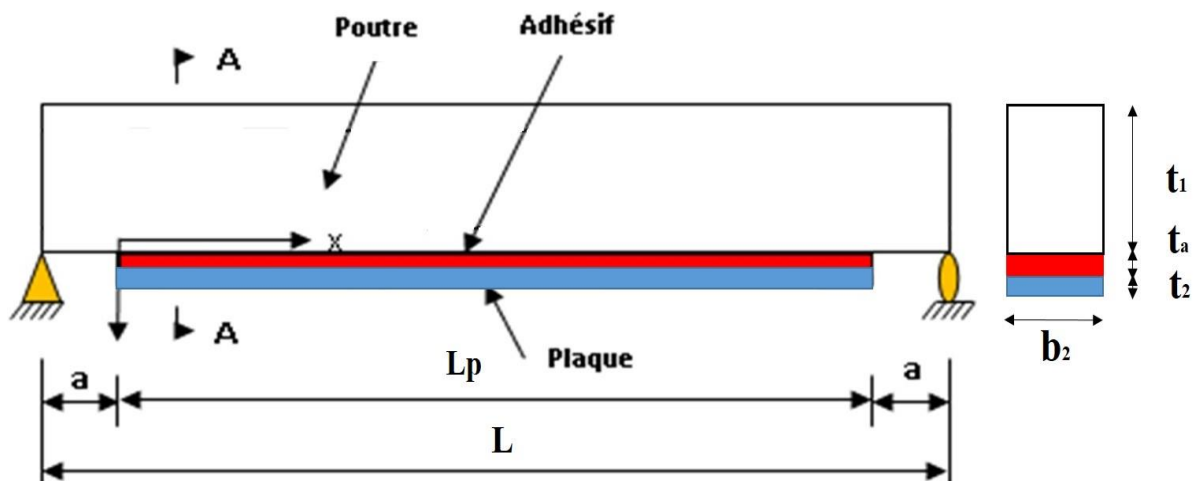
## IV.1. Introduction

La réhabilitation des structures existantes à l'aide de matériaux composites s'impose aujourd'hui comme une solution innovante et efficace face aux sollicitations croissantes dues aux phénomènes naturels et à l'usure du temps. Cette étude s'intéresse particulièrement au décollement des plaques composites en polymère renforcé de fibres (FRP), un phénomène souvent observé près des extrémités des plaques collées, où les contraintes d'interface sont les plus élevées lors de sollicitations en flexion. Ces dernières années, de nombreux travaux ont porté sur les techniques de renforcement par matériaux composites.

L'objectif de ce chapitre est proposé une analyse et modélisation des contraintes d'interface améliorée pour supporter une poutre en béton armé poreuse endommagée réparée par collage des plaques en matériaux composites; 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.*

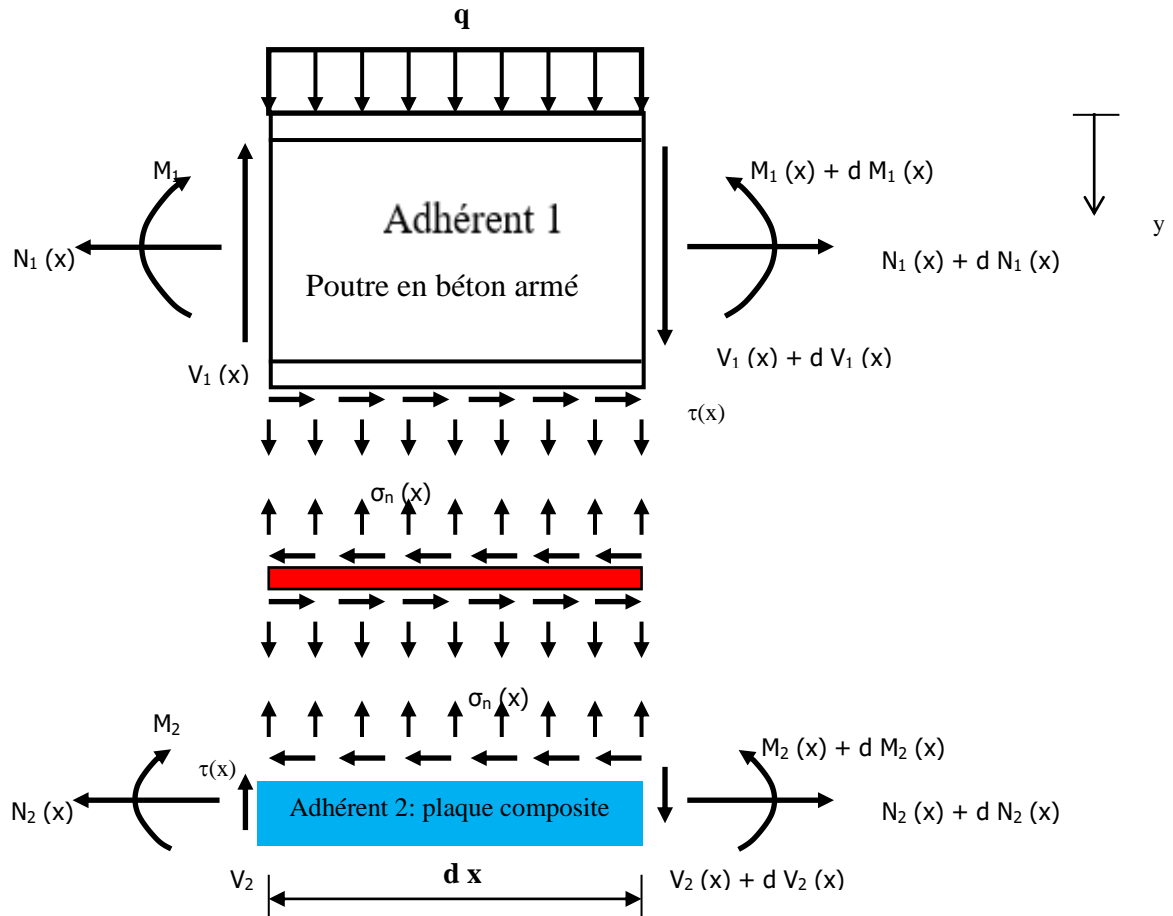


Figure IV.2 : Un segment différentiel de la poutre en béton renforcée par collage de composite

### 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 :

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

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

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

largueur 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.

La loi de mélange du composite est donnée par (**Berthelot J.M., 2002**):

$$E_2 = V_f \cdot E_f + E_m \cdot V_m \quad \text{(IV.3)}$$

$$V_f + V_m = 1 \quad \text{(IV.4)}$$

Où  $V_f$  est la fraction volumique des fibres ;  $V_m$  est la fraction volumique de la matrice,  $E_f$  est module de Young des fibres,  $E_m$  est module de Young de la matrice.

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

$$\text{Dans la direction x: } \frac{dN_1(x)}{dx} = -b_2\tau(x) \quad \text{(IV.5)}$$

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

$$\text{Dans la direction y: } \frac{dV_1}{dx} = -[\sigma_n(x)b_2 + qb_1] \quad \text{(IV.6)}$$

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.

$$\text{Le moment d'équilibre: } \frac{dM_1}{dx} = V_1(x) - \tau(x)b_2 \cdot y_1 \quad \text{(IV.7)}$$

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

$$\text{Dans la direction x: } \frac{dN_2(x)}{dx} = b_2\tau(x) \quad \text{(IV.8)}$$

$$\text{Dans la direction y: } \frac{dV_2}{dx} = \sigma_n(x)b_2 \quad \text{(IV.9)}$$

$$\text{Le moment d'équilibre: } \frac{dM_2}{dx} = V_2(x) - \tau(x)b_2 \cdot y_2 \quad \text{(IV.10)}$$

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 :

$$\tau(x) = K_s \Delta u(x) = K_s [u_2(x) - u_1(x)] \quad (\text{IV.11})$$

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 :

$$K_s = \frac{\tau(x)}{\Delta u(x)} = \frac{\tau(x)}{\Delta u(x)/t_a} \frac{1}{t_a} = \frac{G_a}{t_a} \quad (\text{IV.12})$$

$\Delta u(x)$  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.11), (IV.1) et (IV.2) par rapport à  $x$ , et en négligeant le moment de flexion de la plaque composite nous aurons :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = K_s \left[ \left( \frac{y_2}{E_2 I_2} M_2(x) + \frac{N_2 + P_2}{E_2 A_2} - \frac{t_2}{3G_2} \frac{d\tau_a}{dx} \right) - \left( \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1 + P_1}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{3G_1} \frac{d\tau_a}{dx} \right) \right] \quad (\text{IV.13})$$

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:

$$M_1(x) = R M_2(x) \quad (\text{IV.14})$$

$$\text{Avec :} \quad R = \frac{E_1 I_1}{E_2 I_2} \quad (\text{IV.15})$$

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

$$M_T(x) = M_1(x) + M_2(x) + N(x)(y_1 + y_2 + t_a) \quad (\text{IV.16})$$

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

$$N(x) = N_1(x) = N_2(x) = b_2 \int_0^x \tau(x) dx \quad (\text{IV.17})$$

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 :

$$M_1(x) = \frac{R}{R+1} \left[ M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a) dx \right] \quad (\text{IV.18})$$

$$M_2(x) = \frac{1}{R+1} \left[ M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a) dx \right] \quad (\text{IV.19})$$

En dérivant les expressions (IV.16) et (IV.17) nous aurons :

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = \frac{R}{R+1} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (\text{IV.20})$$

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = \frac{1}{R+1} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (\text{IV.21})$$

En différentiant l'équation (IV.11) nous aurons :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = K_s \left[ \left( \frac{y_2}{E_2 I_2} M_2(x) + \frac{N_2}{E_2 A_2} - \frac{t_2}{3G_2} \frac{d\tau_a}{dx} \right) - \left( \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{3G_1} \frac{d\tau_a}{dx} \right) \right] \quad (\text{IV.22})$$

La substitution de l'effort tranchant (équations (IV.20) et (IV.21)) et l'effort normal (équations (IV.17)) dans l'équation (IV.22) nous permet d'obtenir l'équation différentielle des contraintes d'interface de cisaillement :

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} - K_1 b_2 \left( \frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} + \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right) \tau(x) + K_1 \left( \frac{y_1 + y_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) V_T(x) = 0 \quad (\text{IV.23})$$

Avec :

$$K_1 = \frac{1}{\left( \frac{t_a}{G_a} + \frac{t_1}{3G_1} + \frac{t_2}{3G_2} \right)} \quad (\text{IV.24})$$

La solution de l'équation différentielle (équation (IV.23)) ci-dessus est donné par :

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sinh(\lambda x) + m_1 V_T(x) \quad (\text{IV.25})$$

Avec :

$$\lambda^2 = K_1 b_2 \left( \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} + \frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \quad (\text{IV.26})$$

$$m_1 = \frac{K_1}{\lambda^2} \left( \frac{(y_1 + y_2)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \quad (\text{IV.27})$$

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

Pour  $0 \leq x \leq L_p$  :

$$\tau(x) = \left[ \frac{m_2 a}{2\lambda} (L - a) - m_1 \right] \frac{q e^{-\lambda x}}{\lambda} + m_1 q \left[ \frac{L}{2} - x - a \right], m_2 = \frac{K_1 y_1}{E_1 I_1} \quad (\text{IV.28})$$

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 :

$$\sigma_n(x) = K_n \Delta w(x) = K_n [w_2(x) - w_1(x)] \quad (\text{IV.29})$$

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

$$K_n = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x)} = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x) / t_a} \left( \frac{1}{t_a} \right) = \frac{E_a}{t_a} \quad (\text{IV.30})$$

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

En dérivant l'équation (IV.27) deux fois il en résulte :

$$\frac{d^2 \sigma_n(x)}{dx^2} = K_n \left[ \frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} - \frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} \right] \quad (\text{IV.31})$$

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

$$\frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} = -\frac{M_1(x)}{E_1 I_1}, \quad \frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} = -\frac{D_{11} M_2(x)}{E_2 I_2} \quad (\text{IV.32})$$

En se basant sur les équations d'équilibre (IV.5) et (IV.10) 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 :

$$\text{Adhérent 1 : } \frac{d^4 w_1(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_1 I_1} b_2 \sigma_n(x) + \frac{y_1}{E_1 I_1} b_2 \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_1 I_1} \quad (\text{IV.33})$$

$$\text{Adhérent 2 : } \frac{d^4 w_2(x)}{dx^4} = -\frac{1}{E_2 I_2} b_2 \sigma_n(x) + \frac{y_2}{E_2 I_2} b_2 \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (\text{IV.34})$$

La substitution des équations (IV.33) et (IV.34) dans la quatrième dérivée de la contrainte normale obtenue à partir de l'équation (IV.29) donne l'équation différentielle régissant la contrainte normale d'interface :

$$\frac{d^4 \sigma_n(x)}{dx^4} + \frac{E_a b_2}{t_a} \left( \frac{1}{E_1 I_1} + \frac{1}{E_2 I_2} \right) \sigma_n(x) + \frac{E_a b_2}{t_a} \left( \frac{y_1}{E_1 I_1} - \frac{y_2}{E_2 I_2} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q E_a}{t_a E_1 I_1} = 0 \quad (\text{IV.35})$$

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

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] + e^{\beta x} [C_3 \cos(\beta x) + C_4 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (\text{IV.36})$$

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 :

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (\text{IV.37})$$

Où :

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E_a b_2}{4 t_a} \left( \frac{1}{E_1 I_1} + \frac{1}{E_2 I_2} \right)} \quad (\text{IV.38})$$

$$n_1 = \left( \frac{y_1 E_2 I_2 - y_2 E_1 I_1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \quad (\text{IV.39})$$

$$n_2 = \frac{E_2 I_2}{b_2 (E_1 I_1 + E_2 I_2)} \quad (\text{IV.40})$$

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

$$C_1 = \frac{K_n}{2\beta^3 E_1 I_1} [V_T(0) + \beta M_T(0)] - \frac{n_3}{2\beta^3} \tau(0) + \frac{n_1}{2\beta^3} \left( \frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \quad (\text{IV.41})$$

$$C_2 = -\frac{K_n}{2\beta^2 E_1 I_1} M_r(0) - \frac{n_1}{2\beta^2} \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \quad (\text{IV.42})$$

Où :

$$n_3 = \frac{E_a b_2}{t_a} \left( \frac{y_1}{E_1 I_1} - \frac{y_2}{E_2 I_2} \right) \quad (\text{IV.43})$$

### IV.3. Conclusion

Ce chapitre a présenté une analyse théorique de l'interface entre une poutre en béton armé et une plaque de renforcement en matériau composite, collée à l'aide d'une couche d'adhésif. En s'appuyant sur des hypothèses simplificatrices telles que le comportement élastique linéaire des matériaux et la constance des contraintes dans l'épaisseur de l'adhésif, un modèle fiable a été développé.

L'étude a permis de démontrer que les contraintes normales et de cisaillement à l'interface sont fortement influencés par les propriétés mécaniques des matériaux et par la géométrie de l'assemblage. Le transfert des efforts entre la poutre en béton armé et le renfort composite dépend directement de la qualité de l'interface adhésive, ce qui justifie l'importance d'une modélisation rigoureuse.

*Chapitre V*

*Résultats*

*Et*

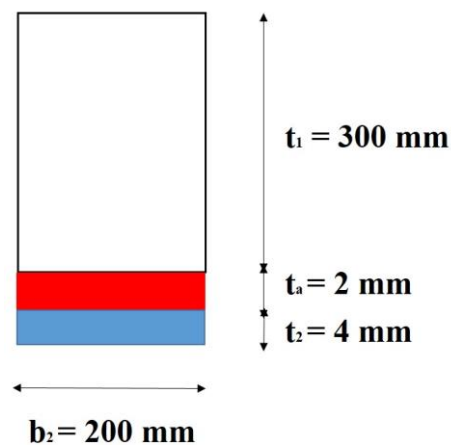
*Discussions*

## V.1. Introduction

Ce chapitre présente les contraintes d'interface dans notre étude de cas : il s'agit d'une poutre en béton poreux de forme rectangulaire, mettant en œuvre la loi de mélange du composite qui se compose de fibres et d'une matrice.

Ce chapitre présente une confrontation de nos résultats avec ceux de la littérature concernant la poutre en béton armé de forme rectangulaire, et une analyse paramétrique sera réalisée pour ce cas d'étude. Nous examinerons minutieusement l'impact des paramètres suivants sur les contraintes d'interface (cisaillement et normale) : influence de la porosité de la poutre en béton armé, influence de facteur d'endommagement, longueur non renforcée ( $a$ ), rigidité de l'adhésif ( $E_a$ ) et son épaisseur ( $t_a$ ), ainsi que l'épaisseur de la plaque composite ( $t_2$ ).

## 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)	$\nu$
Fibre de carbone	$E_f = 140000$	5000	0.28
Matrice	$E_m = 10000$	/	/
Fraction volumique des fibres	$V_f = 0.7$	/	/
Poutre en BA	$E_1 = 30000$	12711.9	0.18
Couche d'adhésive	$E_a = 3000$	1111.11	0.35

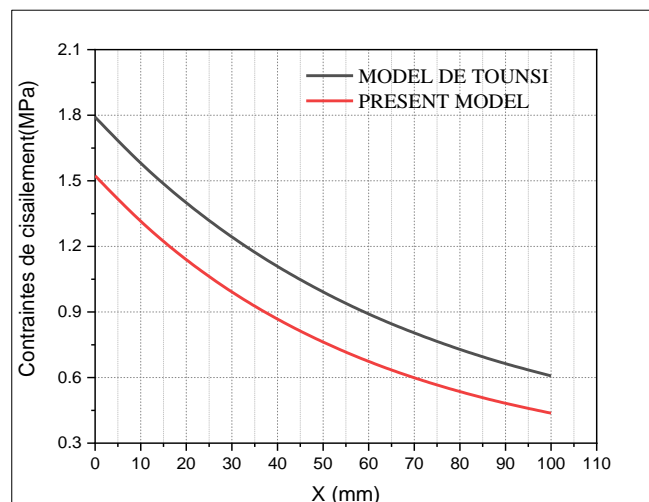
**Tableau V.2 : chargement et géométrie.**

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 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.



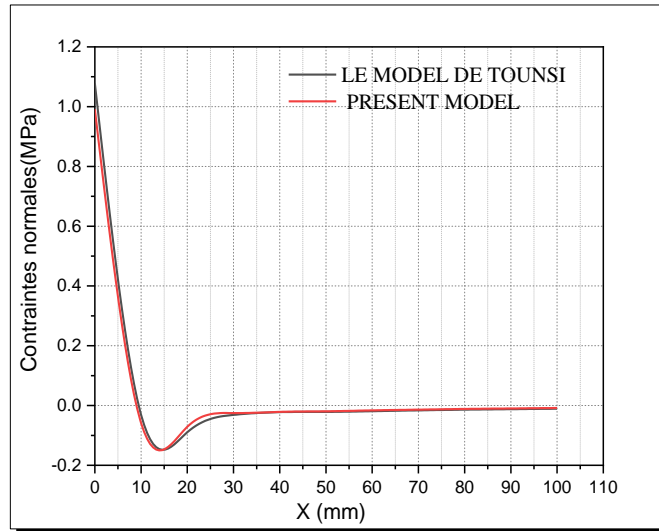


Figure V.2 : Comparaison des contraintes d’interface d’une poutre en BA poreuse endommagée réparée par matériaux composites.

### V.4. Etude paramétrique

Les paramètres fixés pour les tous les graphes sont :  $x = 0$  ;  $\alpha = 1\%$ ,  $d = 0.1$ .

#### 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 de Vf.

Tableau V.3 : Effet de la longueur non renforcée a sur les contraintes d’interface pour une poutre en BA poreuse endommagée réparée par matériaux composite.

		Vf = 0.5		Vf = 0.55		Vf = 0.6		Vf = 0.65		Vf = 0.7		
d	a (mm)	$\tau$ (Mpa)	$\sigma$ (Mpa)	$\tau$ (Mpa)	$\sigma$ (Mpa)	$\tau$ (Mpa)	$\sigma$ (Mpa)	$\tau$ (Mpa)	$\sigma$ (Mpa)	$\tau$ (Mpa)	$\sigma$ (Mpa)	
$\alpha = 0$	0	100	0.600	0.422	0.632	0.435	0.663	0.448	0.693	0.460	0.721	0.471
		200	0.965	0.677	1.011	0.695	1.056	0.712	1.098	0.727	1.138	0.742
		300	1.301	0.912	1.361	0.934	1.418	0.955	1.472	0.974	1.523	0.992
		400	1.610	1.128	1.682	1.154	1.749	1.178	1.814	1.200	1.875	1.221
	0.1	100	0.642	0.453	0.676	0.467	0.467	0.480	0.741	0.493	0.771	0.504
		200	1.028	0.723	1.077	0.742	1.123	0.760	1.168	0.776	1.211	0.791
		300	1.383	0.973	1.446	0.996	1.506	1.018	1.562	1.038	1.616	1.056
		400	1.709	1.202	1.785	1.229	1.856	1.254	1.923	1.277	1.988	1.299
	0.2	100	0.692	0.489	0.728	0.505	0.763	0.519	0.797	0.532	0.829	0.544
		200	1.101	0.778	1.153	0.798	1.203	0.817	1.250	0.834	1.294	0.849
		300	1.479	1.045	1.545	1.069	1.608	1.092	1.667	1.112	1.724	1.131
		400	1.825	1.289	1.904	1.317	1.979	1.343	2.050	1.367	2.117	1.390
$\alpha = 0.01$	0	100	0.600	0.422	0.632	0.435	0.663	0.448	0.693	0.460	0.721	0.471
		200	0.965	0.677	1.011	0.695	1.056	0.712	1.098	0.727	1.138	0.742

<b><math>\alpha = 0.02</math></b>	<b>0.1</b>	<b>300</b>	1.301	1.301	1.361	0.934	1.418	0.955	1.472	0.974	1.523	0.992
		<b>400</b>	1.610	1.128	1.682	1.154	1.749	1.178	1.814	1.200	1.875	1.221
		<b>100</b>	0.642	0.453	0.676	0.467	0.709	0.480	0.741	0.493	0.771	0.504
		<b>200</b>	1.028	0.723	1.077	0.742	1.123	0.760	1.168	0.776	1.211	0.791
	<b>0.2</b>	<b>300</b>	1.383	0.973	1.446	0.996	1.506	1.018	1.562	1.038	1.616	1.056
		<b>400</b>	1.709	1.202	1.785	1.229	1.856	1.254	1.923	1.277	1.988	1.299
		<b>100</b>	0.692	0.489	0.728	0.505	0.763	0.519	0.797	0.532	0.829	0.544
		<b>200</b>	1.101	0.778	1.153	0.798	1.203	0.817	1.250	0.834	1.294	0.849
	<b>0</b>	<b>300</b>	1.479	1.045	1.545	1.069	1.608	1.092	1.667	1.112	1.724	1.131
		<b>400</b>	1.825	1.289	1.904	1.317	1.979	1.343	2.050	1.367	2.117	1.390
		<b>100</b>	0.600	0.422	0.632	0.435	0.663	0.448	0.693	0.460	0.721	0.471
		<b>200</b>	0.965	0.677	1.011	0.695	1.056	0.712	1.098	0.727	1.138	0.742
		<b>300</b>	1.301	0.912	1.361	0.934	1.418	0.955	1.472	0.974	1.523	0.992
		<b>400</b>	1.610	1.128	1.682	1.154	1.749	1.178	1.814	1.200	1.875	1.221
		<b>100</b>	0.642	0.453	0.676	0.467	0.709	0.480	0.741	0.493	0.771	0.504
		<b>200</b>	1.028	0.723	1.077	0.742	1.123	0.760	1.168	0.776	1.211	0.791
<b>0.1</b>	<b>300</b>	1.383	0.973	1.446	0.996	1.506	1.018	1.562	1.038	1.616	1.056	
	<b>400</b>	1.709	1.202	1.785	1.229	1.856	1.254	1.923	1.277	1.988	1.299	
	<b>100</b>	0.6918	0.4895	0.728	0.505	0.763	0.519	0.797	0.532	0.829	0.544	
	<b>200</b>	1.1012	0.7782	1.153	0.798	1.203	0.817	1.250	0.834	1.294	0.849	
<b>0.2</b>	<b>300</b>	1.4789	1.0447	1.545	1.069	1.608	1.092	1.667	1.112	1.724	1.131	
	<b>400</b>	1.8251	1.2889	1.904	1.317	1.979	1.343	2.050	1.367	2.117	1.390	

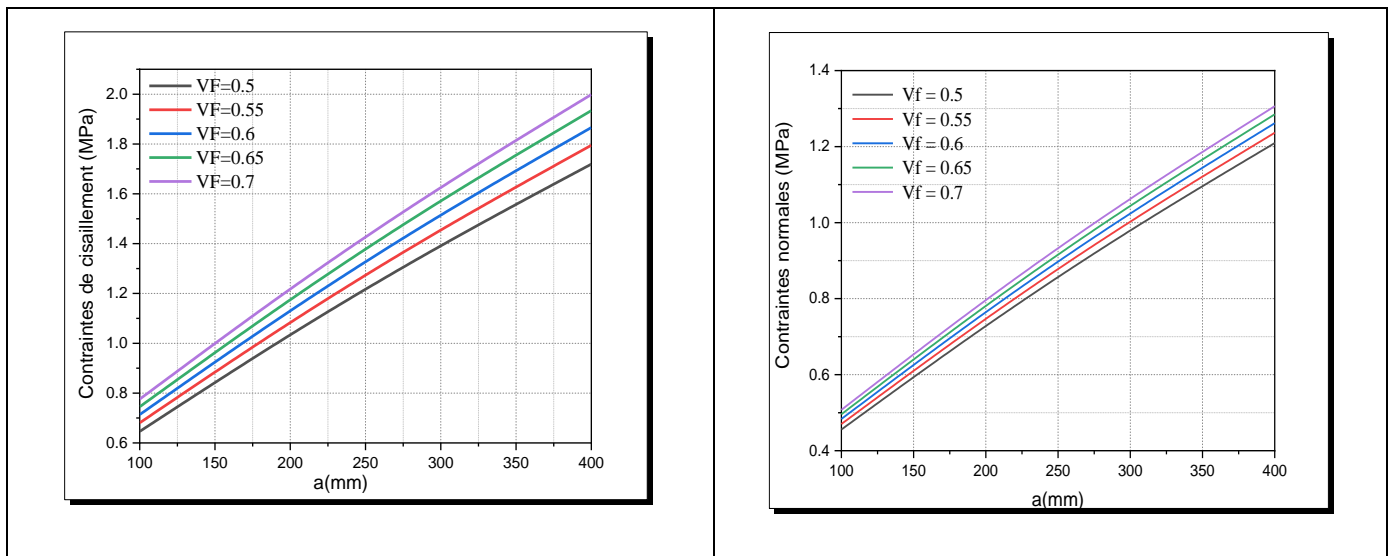
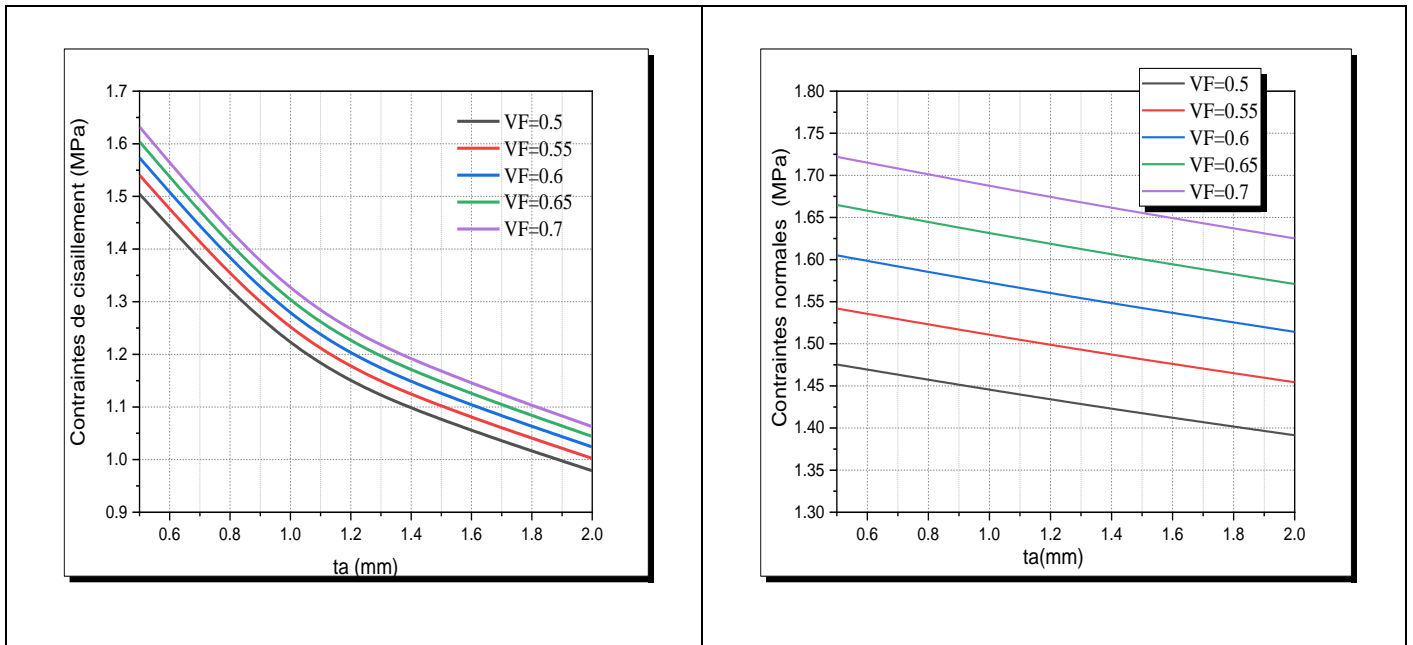


Figure V.3 : Effet de la longueur non renforcée a sur les contraintes d'interface pour une poutre en béton armé poreuse endommagée réparée par matériau composite.

On remarque que les contraintes d'interface qu'elles soient de cisaillement ou normales, augmentent progressivement avec la longueur a.

**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 Vf 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 endommagée réparée par matériau composite.*

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.

*Tableau V.4 : Effet de l'épaisseur de l'adhésif  $t_a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre en béton armé poreuse endommagée réparée par matériau composite.*

		Vf = 0.5		Vf = 0.55		Vf = 0.6		Vf = 0.65		Vf = 0.7		
d	$t_a$ (mm)	$\tau$ (Mpa)	$\sigma$ (Mpa)	$\tau$ (Mpa)	$\sigma$ (Mpa)	$\tau$ (Mpa)	$\sigma$ (Mpa)	$\tau$ (Mpa)	$\sigma$ (Mpa)	$\tau$ (Mpa)	$\sigma$ (Mpa)	
$\alpha = 0$	0	0.5	1.388	1.409	1.451	1.443	1.512	1.475	1.569	1.504	1.623	1.531
		1.0	1.357	1.143	1.419	1.171	1.478	1.197	1.534	1.220	1.587	1.242
		1.5	1.328	1.004	1.389	1.028	1.446	1.051	1.501	1.072	1.554	1.091
		2.0	1.301	0.912	1.360	0.934	1.417	0.955	1.470	0.974	1.523	0.992
	0.1	0.5	1.467	1.496	1.533	1.531	1.596	1.564	1.656	1.594	1.713	1.623
		1.0	1.437	1.216	1.502	1.245	1.564	1.271	1.622	1.296	1.678	1.319
		1.5	1.409	1.070	1.473	1.095	1.534	1.119	1.591	1.140	1.643	1.161
		2.0	1.383	0.973	1.446	0.996	1.505	1.017	1.562	1.037	1.616	1.056
	0.2	0.5	1.559	1.597	1.629	1.635	1.695	1.669	1.757	1.700	1.817	1.730
		1.0	1.531	1.301	1.599	1.331	1.664	1.359	1.725	1.385	1.784	1.408
		1.5	1.504	1.146	1.571	1.173	1.635	1.198	1.695	1.220	1.753	1.241
		2.0	1.478	1.044	1.545	1.068	1.607	1.091	1.667	1.112	1.724	1.131
$\alpha = 0.01$	0	0.5	1.388	1.409	1.451	1.443	1.512	1.475	1.569	1.504	1.623	1.531
		1.0	1.357	1.143	1.419	1.171	1.478	1.196	1.534	1.220	1.587	1.242

		1.5	1.328	1.004	1.389	1.028	1.446	1.051	1.501	1.072	1.554	1.091	
		2.0	1.301	0.912	1.361	0.934	1.417	0.955	1.471	0.974	1.523	0.992	
	0.1	0.5	1.467	1.496	1.533	1.531	1.596	1.564	1.656	1.594	1.713	1.623	
		1.0	1.437	1.216	1.502	1.245	1.560	1.271	1.622	1.296	1.678	1.319	
		1.5	1.409	1.070	1.474	1.095	1.534	1.119	1.591	1.140	1.646	1.161	
		2.0	1.383	0.973	1.446	0.996	1.505	1.017	1.562	1.037	1.616	1.056	
	0.2	0.5	1.559	1.597	1.629	1.635	1.695	1.669	1.757	1.700	1.817	1.730	
		1.0	1.531	1.301	1.599	1.331	1.664	1.359	1.725	1.385	1.784	1.408	
		1.5	1.504	1.147	1.572	1.173	1.635	1.198	1.695	1.220	1.753	1.241	
		2.0	1.478	1.478	1.545	1.068	1.607	1.091	1.667	1.112	1.723	1.131	
	$\alpha = 0.02$	0	0.5	1.388	1.409	1.451	1.443	1.512	1.475	1.569	1.504	1.623	1.531
			1.0	1.357	1.143	1.419	1.171	1.478	1.196	1.534	1.220	1.587	1.242
			1.5	1.328	1.004	1.389	1.028	1.447	1.051	1.501	1.072	1.554	1.091
			2.0	1.301	0.912	1.360	0.934	1.417	0.955	1.471	0.974	1.523	0.992
		0.1	0.5	1.467	1.496	1.533	1.532	1.596	1.565	1.656	1.594	1.713	1.623
			1.0	1.437	1.216	1.502	1.245	1.564	1.271	1.622	1.296	1.678	1.319
1.5			1.409	1.070	1.473	1.095	1.534	1.119	1.591	1.140	1.646	1.161	
2.0			1.383	0.973	1.446	0.996	1.505	1.017	1.562	1.037	1.616	1.056	
0.2		0.5	1.559	1.597	1.629	1.635	1.695	1.669	1.757	1.700	1.817	1.730	
		1.0	1.531	1.301	1.599	1.331	1.664	1.359	1.725	1.385	1.784	1.408	
		1.5	1.504	1.146	1.571	1.173	1.635	1.198	1.695	1.220	1.753	1.241	
		2.0	1.478	1.044	1.545	1.068	1.607	1.091	1.667	1.112	1.723	1.131	

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  $wf1$  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 endommagée réparée par matériau composite.

		Vf = 0.5		Vf = 0.55		Vf = 0.6		Vf = 0.65		Vf = 0.7		
d	$t_2$ (mm)	$\tau$ (Mpa)	$\sigma$ (Mpa)	$\tau$ (Mpa)	$\sigma$ (Mpa)	$\tau$ (Mpa)	$\sigma$ (Mpa)	$\tau$ (Mpa)	$\sigma$ (Mpa)	$\tau$ (Mpa)	$\sigma$ (Mpa)	
$\alpha = 0$	0	1.0	0.647	0.317	0.678	0.325	0.708	0.332	0.7364	0.340	0.764	0.346
		2.0	0.922	0.539	0.966	0.552	1.007	0.565	1.048	0.577	1.086	0.589
		3.0	1.130	0.734	1.183	0.752	1.233	0.769	1.281	0.785	1.327	0.800
		4.0	1.301	0.9117	1.360	0.934	1.417	0.955	1.471	0.974	1.523	0.992
	1	1.0	0.689	0.338	0.722	0.347	0.754	0.355	0.785	0.363	0.814	0.370
		2.0	0.982	0.575	1.028	0.590	1.072	0.603	1.115	0.616	1.156	0.628
		3.0	1.202	0.783	1.258	0.803	1.311	0.820	1.362	0.837	1.410	0.853
		4.0	1.383	0.973	1.446	0.9961	1.506	1.017	1.562	1.037	1.616	1.056
	2	1.0	0.739	0.363	0.775	0.373	0.809	0.382	0.841	0.390	0.873	0.397
		2.0	1.052	0.618	1.101	0.634	1.149	0.648	1.194	0.662	1.237	0.675
		3.0	1.287	0.841	1.346	0.862	1.402	0.881	1.456	0.898	1.507	0.915
		4.0	1.478	1.044	1.545	1.068	1.607	1.091	1.667	1.112	1.723	1.131
$\alpha =$	0	1.0	0.647	0.317	0.678	0.325	0.708	0.332	0.736	0.340	0.764	0.346

<b>0.01</b>		<b>2.0</b>	0.922	0.539	0.966	0.552	1.007	0.565	1.048	0.577	1.086	0.589	
		<b>3.0</b>	1.130	0.7335	1.182	0.752	1.233	0.769	1.281	0.785	1.327	0.800	
		<b>4.0</b>	1.301	0.912	1.360	0.934	1.417	0.955	1.471	0.974	1.523	0.992	
	<b>1</b>	<b>1.0</b>	0.689	0.338	0.722	0.347	0.754	0.355	0.785	0.363	0.814	0.370	
		<b>2.0</b>	0.982	0.575	1.028	0.590	1.073	0.603	1.116	0.616	1.156	0.628	
		<b>3.0</b>	1.203	0.783	1.258	0.803	1.312	0.821	1.362	0.837	1.411	0.853	
	<b>2</b>	<b>1.0</b>	0.739	0.364	0.775	0.373	0.809	0.382	0.841	0.390	0.873	0.398	
		<b>2.0</b>	1.052	0.618	1.102	0.634	1.149	0.648	1.195	0.662	1.238	0.675	
		<b>3.0</b>	1.287	0.842	1.346	0.862	1.403	0.881	1.456	0.898	1.501	0.915	
	<b><math>\alpha = 0.02</math></b>	<b>0</b>	<b>1.0</b>	0.647	0.317	0.678	0.708	0.708	0.332	0.340	0.736	0.764	0.347
			<b>2.0</b>	0.922	0.539	0.966	0.552	1.008	0.563	1.048	0.577	1.087	0.589
			<b>3.0</b>	1.130	0.734	1.183	0.752	1.233	0.769	1.281	0.785	1.328	0.800
<b>1</b>		<b>1.0</b>	0.664	0.293	0.696	0.301	0.726	0.308	0.756	0.315	0.784	0.321	
		<b>2.0</b>	0.947	0.499	0.992	0.512	1.034	0.524	1.076	0.535	1.115	0.545	
		<b>3.0</b>	1.160	0.680	1.214	0.697	1.266	0.712	1.315	0.727	1.362	0.740	
<b>2</b>		<b>1.0</b>	0.714	0.316	0.749	0.325	0.781	0.332	0.813	0.339	0.844	0.346	
		<b>2.0</b>	1.018	0.538	1.066	0.552	1.112	0.564	1.156	0.576	1.198	0.587	
		<b>3.0</b>	1.246	0.732	1.303	0.750	1.358	0.767	1.410	0.782	1.460	0.797	
		<b>4.0</b>	1.432	0.909	1.496	0.930	1.557	0.950	1.615	0.968	1.670	0.985	

Les deux graphiques montrent que les contraintes d'interface (cisaillement et normale) augmentent lorsque l'épaisseur  $t_2$  augmente.

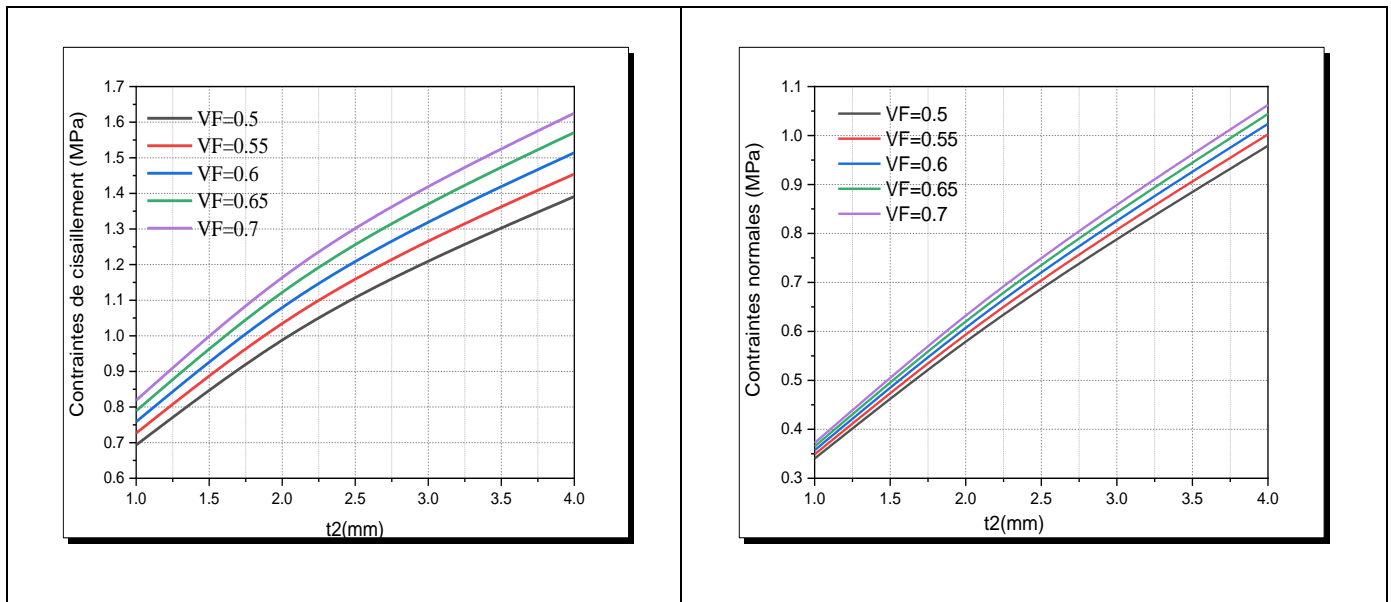
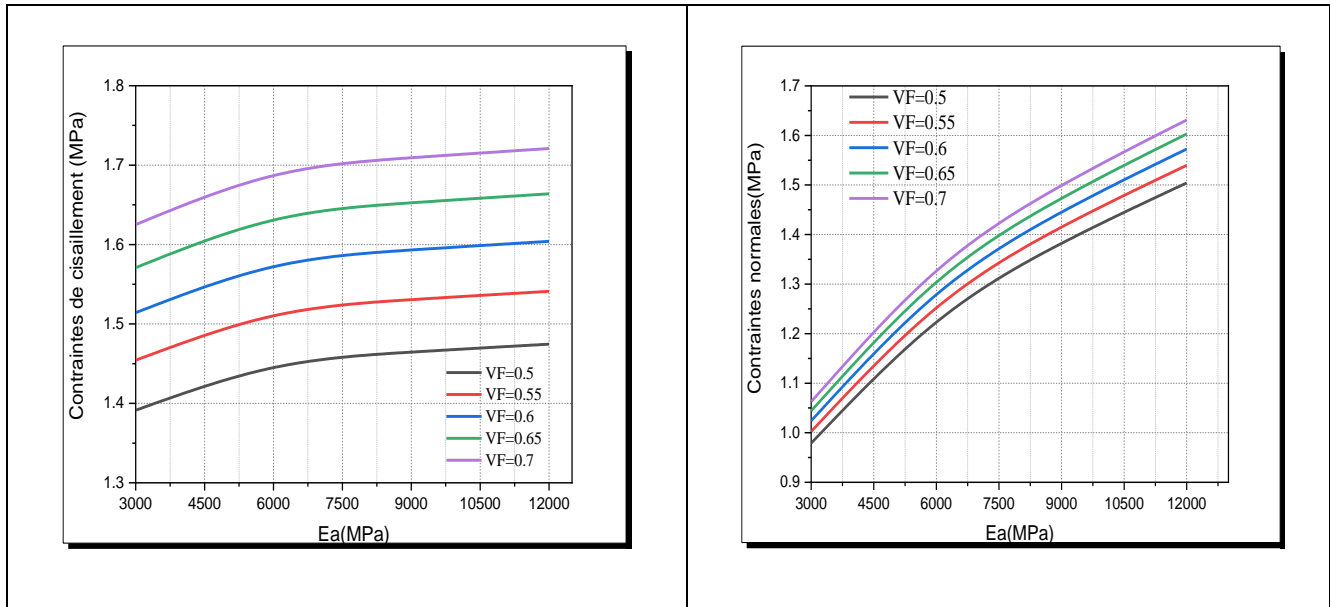


Figure V.5 : Effet de l'épaisseur  $t_2$  sur les contraintes d'interface pour une poutre en béton armé poreuse endommagée réparée par matériau composite.

**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  $V_f$ .

On constate que les contraintes d'interface augmentent avec l'augmentation de la rigidité de la colle  $E_a$ .



*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 endommagée réparée par matériau composite.*

*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).*

		<b>Vf = 0.5</b>		<b>Vf = 0.55</b>		<b>Vf = 0.6</b>		<b>Vf = 0.65</b>		<b>Vf = 0.7</b>		
<b>d</b>	<b><math>E_a</math> (Mpa)</b>	<b><math>\tau</math> (Mpa)</b>	<b><math>\sigma</math> (Mpa)</b>	<b><math>\tau</math> (Mpa)</b>	<b><math>\sigma</math> (Mpa)</b>	<b><math>\tau</math> (Mpa)</b>	<b><math>\sigma</math> (Mpa)</b>	<b><math>\tau</math> (Mpa)</b>	<b><math>\sigma</math> (Mpa)</b>	<b><math>\tau</math> (Mpa)</b>	<b><math>\sigma</math> (Mpa)</b>	
<b><math>\alpha = 0</math></b>	<b>0</b>	3000	1.301	0.912	1.360	0.934	1.417	0.955	1.471	0.974	1.523	0.992
		6000	1.356	1.143	1.418	1.170	1.477	1.196	1.533	1.220	1.587	1.242
		9000	1.377	1.293	1.440	1.325	1.499	1.353	1.556	1.380	1.611	1.405
		12000	1.387	1.408	1.451	1.442	1.511	1.474	1.568	1.503	1.622	1.53
	<b>0.1</b>	3000	1.383	0.973	1.446	0.996	1.505	1.017	1.562	1.037	1.616	1.056
		6000	1.437	1.215	1.502	1.245	1.563	1.271	1.622	1.295	1.678	1.318
		9000	1.456	1.374	1.522	1.406	1.584	1.436	1.644	1.464	1.700	1.491
		12000	1.466	1.495	1.533	1.530	1.595	1.563	1.655	1.593	1.712	1.622
	<b>0.2</b>	3000	1.478	1.044	1.545	1.068	1.607	1.091	1.667	1.112	1.723	1.131
		6000	1.531	1.300	1.598	1.330	1.663	1.358	1.724	1.384	1.783	1.408
		9000	1.549	1.468	1.618	1.502	1.683	1.533	1.745	1.562	1.804	1.589
		12000	1.558	1.597	1.628	1.634	1.694	1.668	1.756	1.699	1.815	1.728
<b><math>\alpha = 0.01</math></b>	<b>0</b>	3000	1.301	0.912	1.360	0.934	1.417	0.955	1.471	0.974	1.523	0.992
		6000	1.356	1.143	1.418	1.170	1.477	1.196	1.533	1.220	1.587	1.242
		9000	1.377	1.293	1.440	1.325	1.499	1.353	1.556	1.380	1.610	1.405

		<b>12000</b>	1.387	1.408	1.451	1.442	1.511	1.474	1.568	1.503	1.622	1.530
	<b>0.1</b>	<b>3000</b>	1.383	0.973	1.446	0.996	1.505	1.017	1.562	1.037	1.616	1.056
		<b>6000</b>	1.437	1.215	1.502	1.244	1.563	1.271	1.622	1.295	1.678	1.318
		<b>9000</b>	1.456	1.374	1.522	1.406	1.584	1.436	1.644	1.464	1.700	1.490
		<b>12000</b>	1.466	1.495	1.533	1.53	1.595	1.563	1.655	1.593	1.712	1.622
	<b>0.2</b>	<b>3000</b>	1.478	1.044	1.545	1.068	1.607	1.091	1.667	1.112	1.723	1.131
		<b>6000</b>	1.530	1.300	1.598	1.330	1.091	1.358	1.724	1.384	1.783	1.408
		<b>9000</b>	1.549	1.468	1.618	1.502	1.683	1.533	1.745	1.562	1.804	1.589
		<b>12000</b>	1.558	1.597	1.628	1.634	1.694	1.668	1.756	1.699	1.815	1.728
<b><math>\alpha = 0.02</math></b>	<b>0</b>	<b>3000</b>	1.301	0.912	1.360	0.934	1.417	0.955	1.471	0.974	1.523	0.992
		<b>6000</b>	1.357	1.143	1.418	1.170	1.477	1.196	1.533	1.220	1.587	1.242
		<b>9000</b>	1.377	1.293	1.440	1.325	1.499	1.353	1.556	1.380	1.610	1.405
		<b>12000</b>	1.387	1.408	1.451	1.442	1.511	1.474	1.568	1.503	1.405	1.530
	<b>0.1</b>	<b>3000</b>	1.383	0.973	1.446	0.996	1.505	1.017	1.562	1.037	1.616	1.056
		<b>6000</b>	1.437	1.215	1.502	1.244	1.563	1.271	1.622	1.295	1.678	1.318
		<b>9000</b>	1.456	1.374	1.522	1.406	1.584	1.436	1.644	1.464	1.700	1.490
		<b>12000</b>	1.466	1.495	1.533	1.530	1.595	1.563	1.655	1.593	1.712	1.622
	<b>0.2</b>	<b>3000</b>	1.478	1.044	1.545	1.068	1.607	1.091	1.667	1.112	1.723	1.131
		<b>6000</b>	1.530	1.300	1.598	1.330	1.663	1.358	1.724	1.384	1.783	1.408
		<b>9000</b>	1.549	1.468	1.618	1.502	1.683	1.533	1.745	1.562	1.804	1.804
		<b>12000</b>	1.558	1.597	1.628	1.634	1.694	1.668	1.756	1.699	1.815	1.729

## V.5. Conclusion

Une méthode simple, pour le calcul des contraintes d'interface d'une poutre en béton armé poreuse endommagée réparer par matériau composite pour un chargement uniformément réparti a été présentée dans ce chapitre.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées à partir de cette investigation :

- ✓ Le maximum des contraintes d'interface (pic) est observé au bord de la plaque puis diminuent, rapidement (brusquement) dans le cas des contraintes normales et progressivement pour les contraintes de cisaillement, pour atteindre toutes les deux la valeur zéro à mi travée.
- ✓ Prolonger le plus possible la longueur de la plaque composite de renforcement aux appuis, réduit les contraintes aux bords.
- ✓ L'augmentation de l'épaisseur de la colle d'adhésif conduit à une réduction significative des contraintes de cisaillement et normales.
- ✓ Les contraintes d'interface augmentent avec l'augmentation de la rigidité de la colle et l'épaisseur de la plaque composite.

# *Conclusion Générale*

## Conclusion générale

La réhabilitation et le renforcement des structures en béton armé constituent aujourd'hui un enjeu majeur en génie civil, dans un contexte marqué par le vieillissement généralisé du patrimoine bâti, l'évolution des normes de sécurité et les sollicitations mécaniques et environnementales croissantes. Parmi les solutions modernes qui se sont imposées au cours des dernières décennies, le recours aux matériaux composites, tels que les polymères renforcés de fibres de carbone, s'est avéré particulièrement efficace. Leur légèreté, leur haute résistance mécanique et leur durabilité en font des alliés de choix pour renforcer des éléments structurels, notamment les poutres, sans alourdir excessivement la structure ni modifier sa géométrie.

Toutefois, malgré leurs nombreux avantages, ces techniques ne sont pas exemptes de limitations. Le décollement prématuré à l'interface entre le béton et la plaque composite collée constitue l'un des modes de rupture les plus critiques, pouvant remettre en question l'efficacité globale du renforcement. Ce phénomène, induit par une concentration excessive de contraintes normales et de cisaillement à l'extrémité de la plaque, nécessite une compréhension fine des interactions mécaniques à l'interface afin d'optimiser la conception et de prévenir les défaillances.

Dans cette optique, ce mémoire s'est attaché à développer une approche analytique rigoureuse pour modéliser le comportement d'une poutre en béton armé poreuse endommagée réparée à l'aide d'une plaque composite collée à son intrados. La méthode repose sur les fondements de la théorie de l'élasticité et de la résistance des matériaux.

Une étude paramétrique approfondie a ainsi permis de mieux cerner les conditions optimales de renforcement et d'anticiper les risques d'adhérence insuffisante.

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 :

- Utiliser un autre matériaux composites (FGM ou nano tube de carbone) et voir leur influence sur le renforcement des structures en béton armé.
- Effectuer des études numériques par des logiciels de modélisations et confronter les résultats qui seront trouvés avec ceux calculés par les modèles analytiques.

## Référence bibliographique

(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.

(AMRANI et MEDJADJI 2023) « Etude de renforcement d'une poutre en Béton Précontraint avec des plaques en matériaux composites » Mémoire de fin d'études en Master, Université d'Ain-Temouchent

(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.

(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.

(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.

(SEGHOUANE and RAHO, 2023). « Effet de la réparation par patches en composite sur la durée de vie d'une plaque présentant deux fissures latérales. ». Mémoire de fin d'études en Master. Université Ibn Khaldoun Tiaret.

(Ghabi Asma, 2018). « Analyse statique des plaques stratifiées en matériaux composites. ». Mémoire de fin d'études en Master. Université de Tissemsilt.

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

(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.

(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.

(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.