

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

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

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structures

Présenté par :

BENIDA Anwar

BELMOKHTAR Mohamed

Sujet du mémoire

***Modélisation des contraintes de cisaillement et normale dans
les poutres consoles en béton armé endommagée réparé par
différents types de composites : effet d'orientation des fibres***

Soutenu publiquement le 25/06/2023 devant le jury composé de :

Mr, KRIM Abdallah	Président
Mr, RABAH Abderezak	Rapporteur
Mr, DJEBLI Benyagoub	Examineur
Mr, KERROUM Nadir	Examineur

2022/2023

Remerciements

Avant tout nous remercions ALLAH tout puissant qui nous a donné la patience et la force pour mener à terme ce modeste travail.

**Le travail présenté dans cette mémoire a été réalisé au sein de
Département de génie civil.**

Il est difficile d'exprimer en quelques mots notre profondes reconnaissance envers notre promoteur ; Dr Abderezak RABAHI, qui ont assuré la direction scientifique de ce travail et ont pris le temps de notre faire profiter avec patience de son expérience, ses connaissances et sa disponibilité constante à la réalisation de ce travail qu'il trouve ici l'expression de notre sincères remerciements.

Que les membres de juré soient chaleureusement remerciés d'avoir voulu examiner de près notre travail.

Que l'ensemble des enseignants du département trouve ici notre plus profonds remerciements et ma reconnaissance.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A celle qui m'a donné la vie et l'envie de vivre

A celle qui m'a entouré de sa tendresse, à ma très chère Maman.

boumaaza samia, Belmokhtar Khadidja

Celui qui a été toujours là pour moi, à Celui qui m'indique la bonne voie

En me rappelant que la volonté et un secret de succès, à mon cher Papa.

À mon grand-mère bentata zinabe rabi yarhamha

A Mes très chers frères : Hicham, Amine ,Fethi,youcef ,

A Ma Sœurs : yasmine

A tous ceux qui m'ont encouragé à faire mon voyage de succès et

d'excellence.

Sommaire

<i>Liste des tableaux</i>	<i>III</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>IV</i>
<i>Liste des notations</i>	<i>VI</i>
<i>Résumé</i>	<i>VIII</i>
<i>Abstract</i>	<i>IX</i>
<i>ملخص</i>	<i>X</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>XI</i>
1.2.2. Désordres dus aux erreurs de conception ou d'exécution	6
I.2.3. Modification des conditions d'exploitation des ouvrages	7
<i>I.3. Conclusion</i>	<i>9</i>
<i>II.1. Introduction</i>	<i>11</i>
<i>II.2. Les différentes techniques de réhabilitation</i>	<i>11</i>
<i>II.3. Méthodes de réparation non structurales</i>	<i>12</i>
<i>II.4. Méthodes de réparation structurale</i>	<i>12</i>
II.4.1. Réparation par précontrainte additionnelle	13
II.4.1.2. Réparation par béton projeté	14
II.4.3. Réparation par adjonction d'armature complémentaire	16
II.4.4. Renforcement par collage de plats métalliques	16
<i>II.4.5. Renforcement par collage des plats composites</i>	<i>19</i>
<i>II.5. Application des matériaux composites pour la réparation et le renforcement des ouvrages en béton armé</i>	<i>20</i>
<i>II.6. Conclusion</i>	<i>23</i>
<i>Généralité sur les matériaux composites</i>	<i>19</i>
<i>III.1. Introduction</i>	<i>25</i>
<i>III.2. Définition du matériau composite</i>	<i>25</i>

III.2.1. La matrice.....	26
III.2.1.1. Les matrices minérales	26
III.3.1.1 Les matrices organiques	27
II.2.2. Le renfort	31
<i>III.3. Avantages et inconvénients de matériaux composites.....</i>	<i>33</i>
<i>III.4. Domaine d'utilisation de composite dans le domaine de génie civil</i>	<i>34</i>
III.4.1. Renforcement par composites collés (plats et tissus).....	34
<i>II.5. La théorie de la stratification des composites</i>	<i>36</i>
III.5.1. Définition	36
<i>III.6. Conclusion.....</i>	<i>36</i>
<i>V.1.Introduction.....</i>	<i>38</i>
<i>V.2.Analyse théorique.....</i>	<i>38</i>
V.2.1. La distribution des contraintes de cisaillement dans l'interface composite – Béton. 41	
V.2.2. La distribution des contraintes normales dans l'interface composite – béton.....	43
<i>V.3.Validation du modèle</i>	<i>45</i>
<i>IV.3.2. Validation du modèle.....</i>	<i>45</i>
<i>IV.4. L'étude paramétrique</i>	<i>45</i>
IV.4.1. Effet de la longueur non renforcée (a)	46
IV.4.2. Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive ta	47
<i>IV.5. Conclusion.....</i>	<i>49</i>
<i>Conclusion générale.....</i>	<i>51</i>
<i>Référence bibliographique</i>	

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients du tôle d'acier colle.19

Tableau.III.1: donne une comparaison entre les différentes résines29

Tableau.III.2 : Différents types de fibres de verre. 32

Tableau IV.1 : Propriétés géométriques et mécaniques des matériaux. 45

Tableau IV.2 : L'influence de la longueur non renforcée (a) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en BA réparée par composite en CFRP. 46

Tableau IV.3 : L'influence de la longueur non renforcée (a) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en BA réparée par composite en CFRP. 48

Liste des figures

Figure I.2 : gel-dégel du béton	3
Figure I.3: Altération physico-chimique du béton	4
Figure I.4 : Carbonatation des bétons.....	4
Figure I.5 : Retrait du béton.....	5
Figure I.6 : Fissuration d'un poteau et une poutre en béton armé en milieu salin.....	5
Figure I.7: Fissuration de poutres et de poteaux d'une structure âgée atteinte d'alcali réaction.....	6
Figure. I.8 : Choc sur une pile de pont	7
Figure. I.9 : Délamination du béton d'un hourdis de pont aboutissant à la formation d'un trou	8
Figure II.1: Différents types de réparation par précontrainte additionnelle.....	13
Figure II.2: Détail d'un renforcement d'un poteau carré par précontraintes additionnelles.	14
Figure II.3: Réparation de poutre par béton projeté.....	15
Figure II.5: Réparation de poutre par adjonction d'armature.	16
Figure II.6: Renforcement d'un viaduc par tôles collées.	18
Figure II.7: Différents étapes renforcement d'un poteau par gainage métallique.....	18
Figure II.8: Différentes méthodes de renforcement par le collage de plaques en composites	20
Figure II.9: Mise en œuvre d'une réparation par matériaux composites.	20
Figure II.10 : Mise en œuvre d'une réparation par stratification.....	22
Figure II.11: le renforcement de structures au moyen de composites préfabriqués.....	23
Figure III.1: Matériau composite.....	26
Figure III.2: Les différents types des matrices	26
Figure III.3: Résines thermoplastiques.	28
Figure III.4 : Exemples d'élastomère.....	30

Figure III.5 : Fibre de verre.....	31
Figure III.6: Fibre de carbone.....	32
Figure III.7: Tissue en fibre d'aramide (Kevlar)	33
Figure III.8: Différents types de composite : (a) tissu de fibre de verre ; (b) deux feuillets de fibre de carbone ; (c) plat préfabriqué en fibre de carbone.....	35
Figure III.9: Principales applications industrielles de renforts composites selon la technique EBR (External Bonded Reinforcements) poteau (confinement), renfort de poutre en flexion, et à l'effort tranchant.	35
Figure IV.1 : Poutre console renforcée par des plaques en matériaux composites.....	38
Figure IV.2 : Un segment différentiel de la poutre en béton renforcée par composite.....	39
Figure IV.3: Validation de la présente méthode en comparant avec la méthode de RABAHI.....	45
Figure IV.4: L'influence de la longueur non renforcée (a) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en BA réparée par composite en CFRP.	47
Figure IV.5: L'influence de l'épaisseur de la couche d'adhésive ta sur les contraintes d'interface pour une poutre console en BA réparée par composite en CFRP.....	47
Figure IV.6: L'influence de la hauteur de la poutre t1 sur les contraintes d'interface pour une poutre console en BA réparée par composite en CFRP.....	49

Liste des notations

B_1 et B_2 : Constantes d'intégration.

b_1 : Largeur de la poutre en béton.

b_2 : Largeur de la plaque de renforcement.

C_1 et C_2 : Constantes d'intégration.

E_c : Module de Young de la poutre en béton.

E_a : Module de Young de l'adhésif.

G_a : Module de cisaillement de la couche d'adhésif.

G_i ($i=c, p$) : Module de cisaillement de l'adhérent "i".

I_c : Moment d'inertie de la section du béton.

K_s : Rigidité tangentielle de l'adhésif.

K_n : Rigidité normale de l'adhésif par unité de longueur.

L : Longueur de la poutre.

L_p : Longueur de la plaque de renforcement.

L_0 : Distance entre l'appui et le bord de la plaque.

$M(x)$: Moment fléchissant.

$M_c(x)$ et $M_p(x)$: les moments d'inertie et les moments fléchissant de la poutre en béton et la plaque composite.

$M_T(x)$: Moment total appliqué.

N_i ($i=c, p$) : Force longitudinale pour l'adhérent "i".

$N_c(x)$ et $N_p(x)$: les forces axiales du béton et de la plaque composite respectivement.

$\{N\}$: Vecteur des efforts normaux.

q : Charge répartie.

t_i ($i=c, p$) : Epaisseur de l'adhérent "i".

t_a : Epaisseur de l'adhésif.

$U_N(x, y)$: Déplacement longitudinal dans la poutre renforcée induit par force longitudinale.

u_c : Déplacement longitudinal à la base de la poutre en béton.

u_p : Déplacement longitudinal à la partie supérieur de la plaque.

$V(x)$: Effort tranchant.

$V_c(x)$: Effort tranchant appliqué dans la poutre en béton.

$V_p(x)$: Effort tranchant appliqué dans la plaque de renforcement.

C_1, C_2 : constantes d'intégration déterminées par les conditions aux limites.

w_i ($i=c, p$) : Déplacement vertical de l'adhérent "i".

x : Distance comptée à partir du bord de la plaque de renforcement.

ε_c : Déformation à la base de l'adhérent 1.

E_p : Déformation à la partie supérieure de l'adhérent 2.

$\tau(x)$: Contrainte de cisaillement.

$\sigma_n(x)$: Contrainte normale.

Résumé

Avec le temps, le béton armé est soumis à de nombreux facteurs pouvant être mécaniques, physiques ou chimiques, ou liés à des erreurs de calcul, il est donc nécessaire de choisir des techniques de renforcement et de réparation.

Parmi les techniques de renforcement existantes, les matériaux composites se sont récemment développés et sont de plus en plus couramment utilisés comme alternative aux matériaux conventionnels, principalement en raison de leur haute résistance et rigidité spécifique, mais aussi à cause de leurs propriétés mécaniques ajustables dans des grandes proportions. Cependant, un problème important est associé au renforcement en flexion des poutres en béton armé: le décollement de la plaque de renforcement. En effet, depuis que le renforcement par les matériaux composites a été mis en œuvre, de nombreux essais en laboratoire ont permis de conclure que le délaminage de la plaque de renforcement est le mode de rupture le plus fréquent dû à une forte concentration des contraintes au bord de la plaque de renforcement.

Dans ce travail, nous présentons une méthode analytique basée sur le principe de compatibilité des déformations permettant le calcul des contraintes à l'interface composite – béton en prenant en considération l'effet d'endommagement de béton. Les résultats obtenus sont confrontés à la fois avec les résultats issus de la littérature. Une étude paramétrique a été réalisée afin de mettre en évidence l'impact sur d'autres données.

Mots clés : Réparation, matériaux composites, endommagement de béton, contrainte d'interface.

Abstract

Over time, reinforced concrete is subjected to many factors that can be mechanical, physical or chemical, or related to calculation errors, so it is necessary to choose reinforcement and repair techniques.

Among the existing reinforcement techniques, composite materials have recently developed and are increasingly being used as an alternative to conventional materials, mainly because of their high specific strength and rigidity, but also because of their adjustable mechanical properties in different materials. Large proportions. However, an important problem is associated with the reinforcement in bending of the reinforced concrete beams: the detachment of the reinforcement plate. Indeed, since reinforcement by composite materials has been implemented, numerous laboratory tests have led to the conclusion that the delamination of the reinforcement plate is the most frequent mode of rupture due to a high concentration of stress at the edge. Of the reinforcement plate.

In this work, we present an analytical method based on the principle of compatibility of the deformations allowing the computation of the stresses at the composite - concrete interface by taking into account the effect of concrete damage. The results obtained are confronted with both the results from the literature. A parametric study was conducted to highlight the impact on other data.

Key words: Repair, composite materials, concrete damage, interfaces stress.

ملخص

بمرور الوقت ، تتعرض الخرسانة المسلحة للعديد من العوامل التي يمكن أن تكون ميكانيكية أو فيزيائية أو كيميائية أو متعلقة بأخطاء حسابية ، لذلك من الضروري اختيار تقنيات التعزيز والإصلاح

من بين تقنيات التعزيز الحالية ، تم تطوير المواد المركبة مؤخرًا ويتم استخدامها بشكل متزايد كبديل للمواد التقليدية ، وذلك بسبب قوتها وصلابتها العالية ، ولكن أيضًا بسبب خصائصها الميكانيكية القابلة للتعديل في مواد مختلفة. نسب كبيرة. ومع ذلك ، هناك مشكلة مهمة مرتبطة بالتعزيز في ثني الحزم الخرسانية المسلحة: انفصال لوحة التعزيز. في الواقع ، منذ أن تم تنفيذ التعزيز بالمواد المركبة ، فقد أدت العديد من الاختبارات العملية إلى استنتاج مفاده أن إزالة صفيحة التعزيز هي أكثر طرق التمزق شيوعًا بسبب التركيز العالي للإجهاد عند الحافة. من لوحة التعزيز.

في هذا العمل ، نقدم طريقة تحليلية تستند إلى مبدأ توافق التشوهات التي تسمح بحساب الضغوطات في السطح المركب - الخرسانة من خلال مراعاة الية تأثير الضرر الخراسنة وتواجه النتائج التي تم الحصول عليها مع كل من نتائج الأدب. وأجريت دراسة حدودي لتسليط الضوء على تأثير على البيانات الأخرى

. **الكلمات المفتاحية:** اصلاح ، المواد المركبة ، أضرار ملموسة ، واجهة الإجهاد.

Introduction générale

La plupart des infrastructures de génie civil en service sont en béton. Le béton de ciment constitue certainement un des matériaux de construction les plus durables, qui vieillit généralement lentement et bien. Parfois, il peut arriver que son vieillissement soit accéléré selon les conditions environnementales. La longévité du béton va alors dépendre des attaques d'ordre climatique, chimique ou mécanique. Elle est aussi fortement tributaire de la qualité de l'exécution et de la conception de l'ouvrage lors de la mise en œuvre. Ces ouvrages dégradés ont une durée de vie limitée et plusieurs d'entre eux nécessitent des réparations, voire une reconstruction partielle. Ainsi le domaine des réparations en béton connaît, depuis une dizaine d'années, un essor important dans le secteur du bâtiment et des travaux publics. L'entretien et la réhabilitation des ouvrages ont pris une part grandissante dans le secteur de la construction. La nature et l'origine des défauts sont multiples, l'identification des causes de dégradation est une des étapes les plus importantes dans le processus de réparation. Cette étape est aussi l'une des plus difficiles et délicates de tout le processus. En général, il est impossible d'évaluer la pertinence de réparer une structure ou de choisir les méthodes de réhabilitation sans avoir, au préalable, identifié l'origine ou l'origine de la détérioration.

Si les matériaux composites sont depuis longtemps employés dans des secteurs de pointe comme l'automobile et l'aéronautique, il a fallu attendre une diminution de leurs coûts et le développement de formulations d'adhésifs compatibles avec une mise en œuvre sur chantier pour qu'ils se généralisent dans le domaine de la construction et du génie civil. Au-delà des hautes performances mécaniques qui constituent leur intérêt principal, ils offrent de nombreuses combinaisons possibles en termes de géométrie qui leur permettent de s'adapter à la structure d'accueil. Leur faible masse représente par ailleurs un avantage pratique sur chantier par rapport aux renforcements par collage de tôles métalliques, de même que leur insensibilité à la corrosion induit une rentabilité à long terme en réduisant les coûts de maintenance.

Alors que les applications de réparation par matériaux composites sont maintenant courantes, il est toutefois toujours difficile de prédire leur comportement à long terme et d'évaluer l'état de santé des réparations à un stade donné de leur exploitation en service. C'est d'autant plus vrai que leur mise en œuvre sur chantier à température ambiante ne leur permet pas d'atteindre des niveaux de qualité comparables aux matériaux fabriqués en usine. Par ailleurs, il existe une attente forte en termes de durabilité de ces réparations, ces dernières

devant permettre à la structure hôte de prolonger sa durée de vie, parfois de plusieurs décennies. Le recul sur les premiers cas d'application et les nombreuses recherches portant sur le vieillissement ont permis, ces dernières années, de mieux appréhender l'évolution dans le temps de ces matériaux et de l'assemblage béton/adhésif/composite. En outre, de nombreux guides de recommandation ont vu le jour dans différents pays afin d'édicter les « bonnes pratiques » et d'uniformiser les procédures de mise en œuvre à l'échelle nationale.

Dans ce contexte, la présente étude est consacrée à la modélisation des contraintes d'interface (décollement) dans les poutres en béton armé endommagées simplement appuyées et chargées en flexion, renforcées par des plaques en matériaux composites.

Objectif : Développement d'une solution analytique directe qui détermine les contraintes d'interface au niveau de la couche d'adhésif d'une poutre console en béton armé endommagée réparé par matériaux composite.

Pour cela, notre travail s'articule autour de cinq chapitres :

Le premier chapitre : décrira, à travers une étude bibliographique les pathologies ainsi que quelque réparation. Puisque l'élément étudié dans notre travail est une poutre en béton endommagée, il sera également exposé dans ce chapitre les modes de rupture couramment rencontrés.

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

Le troisième chapitre : fera l'objet d'une description de la théorie des stratifié (la stratification) et l'orientation puisque ces deux paramètres ne doivent pas être négligés dans l'étude des contraintes d'interface.

Le quatrième chapitre : portera sur l'analyse des contraintes d'interface dans les poutres console en béton armé endommagées réparer par des plaques de matériaux composites et voir l'effet d'orientation des fibres.

CHAPITRE I

Pathologies des structures en béton armé



1.1. Introduction

Les structures en béton armé sont largement utilisées dans la construction d'infrastructures telles que les bâtiments, les ponts, les barrages et les fondations. Cependant, malgré leur résistance et leur durabilité, ces structures ne sont pas exemptes de problèmes et peuvent être affectées par diverses pathologies.

Les pathologies des structures en béton armé font référence aux défauts, aux dégradations ou aux problèmes qui surviennent au fil du temps et compromettent l'intégrité et les performances de la structure.

Ces pathologies peuvent être causées par plusieurs facteurs, tels que des erreurs de conception, des défauts de construction, des conditions environnementales agressives, une mauvaise qualité des matériaux ou une utilisation inadéquate de la structure.

Elles peuvent apparaître à différents stades de vie d'une structure, que ce soit pendant la phase de construction, au cours de son exploitation ou après de nombreuses années de service.

Les pathologies les plus courantes rencontrées dans les structures en béton armé comprennent la fissuration, la corrosion de l'armature, la carbonatation, l'érosion chimique et les défauts de construction. Ces problèmes peuvent compromettre la solidité structurelle, réduire la durée de vie prévue de la structure et nécessiter des travaux de réparation et de réhabilitation.

La détection précoce et la prise en charge appropriée de ces pathologies sont essentielles pour prévenir les dommages ultérieurs, assurer la sécurité des occupants et prolonger la durabilité des structures en béton armé.

Des techniques de diagnostic avancées et des méthodes de réparation spécialisées sont utilisées pour évaluer l'étendue des dommages, identifier les causes sous-jacentes et mettre en œuvre des solutions appropriées.

1.2. Pathologies et principales causes des désordres affectant les ouvrages en béton armé

Au fil du temps, les structures en béton armé sont soumises à des déférents conditions d'environnement définies par la localisation géographique (pluie, gel, sels de déverglaçage,...etc.) où elles recevoir des surcharges importantes.

Une étude des pathologies d'un ouvrage se décompose en plusieurs phases, commençant par une visite de l'ouvrage accompagné d'un relevé détaillé des différentes pathologies présentes sur les ouvrages. Puis, on procède à un diagnostic afin de connaître l'origine des pathologies pour préconiser d'une part le classement de l'état de l'ouvrage et d'autre part les travaux à réaliser.

Les pathologies les plus fréquemment citées sont classées en trois types :

- Pathologies dû à la dégradation des matériaux.
- Pathologies dû aux erreurs de conception ou de réalisation.
- Pathologies dû à la modification des conditions d'exploitation. [(**Deghmane Y, Riou O**).2018]

1.2.1. Dégradation des matériaux

Les désordres survenus au niveau des structures sont souvent dus aux dégradations des matériaux employés, Celle-ci commence par la dégradation des propriétés physiques, et plus précisément au comportement mécanique du béton et de l'acier en fonction des conditions environnementales déterminées par la situation géographique de l'installation. Les principales causes de vieillissement sont liées aux phénomènes suivants : [Hamelin.P.2002]]

- Érosion, abrasion, chocs
- Action des cycles de gel-dégel
- Altération physico-chimique du béton
- Retrait du béton
- Corrosion des armatures métalliques.
- Érosion, abrasion et choc

Les ouvrages les plus touchés par l'érosion se situent essentiellement en milieu fluvial et maritime. Ils sont soumis au charriage d'éléments solides induits par les courants, à l'action des vagues à chaque marée. La dégradation du béton par frottement se traduit par la création de défauts géométriques de surface, l'apparition d'épaufrure et par des éclatements superficiels qui entraînent la mise à nu des armatures et l'accélération des risques de corrosion.



Figure I.1 : Erosion du béton [(Deghmane Y, Riou O).2018].

➤ **Action des cycles de gel-dégel**

Selon le taux de porosité et de perméabilité des bétons, l'eau peut s'infiltrer et, sous l'action du gel, gonfler, générer des contraintes internes et créer des fissures [(Ferrier E). 1999], La dégradation par gel-dégel du béton est amplifiée par les chocs thermiques causés par l'apport de chaleur dû à la fusion de la glace.



Figure I.2 : gel-dégel du béton [(Deghmane Y, Riou O).2018]

➤ **Altération physico-chimique du béton**

L'eau et l'hygrométrie des conditions ambiantes sont à l'origine de différents mécanismes de dégradation du béton. L'eau, lors de sa percolation au sein du béton, dissout des constituants tels que la chaux et augmente la porosité du béton. Si, de plus, l'atmosphère est chargée d'anhydride sulfureux, le béton voit sa résistance mécanique diminuer et son niveau d'alcalinité chuter. Cette perte d'alcalinité peut aussi être induite par la carbonations du béton [(Venuat M). 1989].

Une autre cause de vieillissement du béton correspond aux mécanismes d'alcali réaction entre les granulats et le ciment [(Mohamed I). 2004]. La formation de gels expansifs qui en résulte se traduit par un gonflement du béton et par le développement de fissures. Les pertes de performances du béton favorisent la corrosion des armatures sous l'action combinée de l'eau et des chlorures.

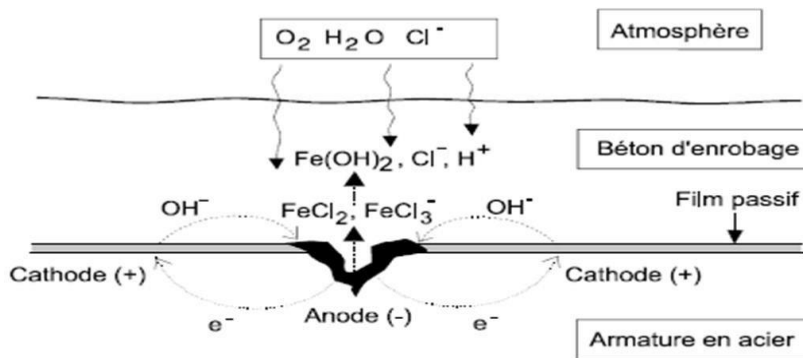


Figure I.3: Altération physico-chimique du béton [(Ndzana A).2007]

➤ Carbonatation des bétons

La carbonatation est un phénomène lent et naturel qui touche la plupart des matériaux de construction : bétons, mortiers, etc. Ces matériaux sont tous sensibles à l'action du CO2 de l'atmosphère qui acidifie le milieu. La corrosion des armatures peut débuter dans le cas du béton armé.

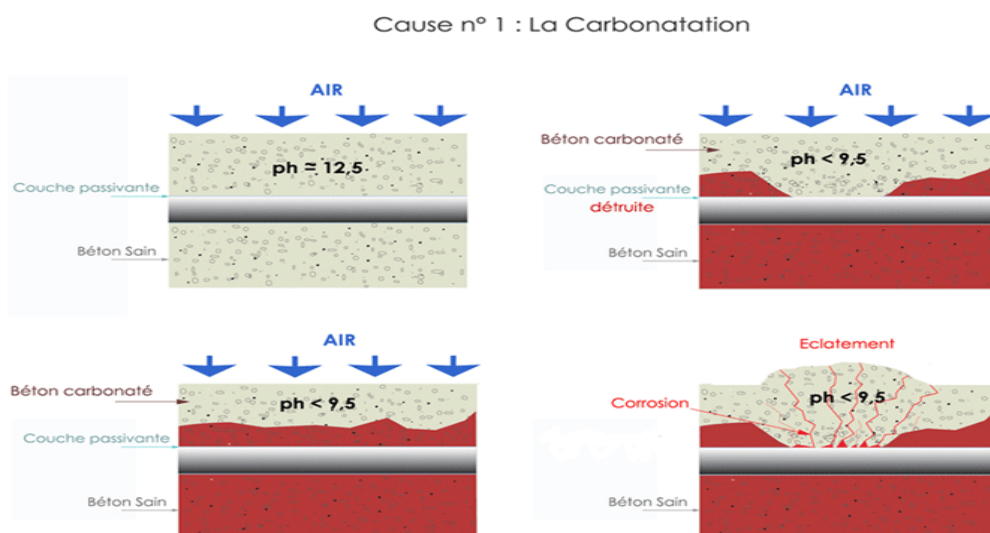


Figure I.4 : Carbonatation des bétons [(Deghmane Y, Riou O).2018].

➤ **Retrait du béton**

L'élimination de la quantité d'eau en excédent dans la formulation d'un béton pour assurer des conditions d'ouvrabilité acceptables se traduit par des variations dimensionnelles du béton. Le retrait, gêné par la présence d'armatures, a tendance à solliciter le béton en traction dès son plus jeune âge et, par conséquent, à créer des fissures.



Figure I.5 : Retrait du béton [(Deghmane Y, Riou O).2018].

➤ **Corrosion des armatures métalliques**

Les différentes causes de fissuration des bétons décrites préalablement limitent la protection des armatures et favorisent la dégradation des aciers passifs ou des câbles de précontrainte en diminuant l'alcalinité du béton et en favorisant l'action des chlorures. Le gonflement des armatures, par formation de rouille, qui en résulte, a tendance à accélérer les mécanismes de fissuration du béton. Figure I.6.

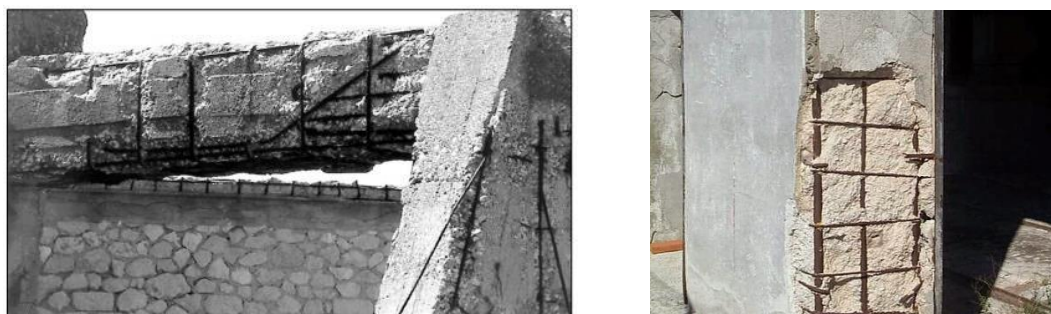


Figure I.6 : Fissuration d'un poteau et une poutre en béton armé en milieu salin. [(Yahiaoui S).2006]

1.2.2. Désordres dus aux erreurs de conception ou d'exécution

Ce type de désordres peut être induit par des erreurs intervenant soit au stade du dimensionnement de l'ouvrage, soit au stade de son exécution.

Dans le premier cas, les causes de fissuration et de dégradation de la structure sont généralement induites par de graves erreurs dans la vérification de la stabilité de l'ouvrage et des conditions de résistance ou, plus simplement, par la prise en considération d'hypothèses erronées au niveau des conditions de chargement, d'environnement ou de fonctionnement de l'ouvrage.

Ces erreurs sont à l'origine, généralement, d'un mauvais dimensionnement des sections et d'une disposition non satisfaisante des armatures qui se traduisent par des localisations de fissures ou de ruptures non acceptables.

Aussi, une évaluation imparfaite des conditions de sollicitations cycliques des ouvrages et des lois de comportement en fatigue des matériaux est susceptible de remettre en cause les résultats de calcul et le dimensionnement pour une durée de vie escomptée.

Les erreurs d'exécution qui sont susceptibles de justifier une intervention au niveau de l'ouvrage portent sur les imperfections de coffrage, les défauts de bétonnage **Figure 1.6**, les incohérences du ferrailage ou sur les conditions non satisfaisantes de décoffrage.



Figure 1.7: Fissuration de poutres et de poteaux d'une structure âgée atteinte d'alcali réaction [(Yahiaoui S).2006]

1.2.3. Modification des conditions d'exploitation des ouvrages

En fonction de l'évolution du trafic, ou de la voirie, il est possible de justifier la nécessité de renforcer ou d'améliorer la portance d'un ouvrage. 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 ou une sous-évaluation des charges d'exploitation. Il faut aussi évoquer la nécessité, dans certains cas, de prendre en considération des sollicitations extrêmes (climatiques ou accidentelles). C'est notamment le cas de la mise en conformité des ponts ou bâtiment vis-à-vis des sollicitations sismiques où un séisme, même léger, peut être la source de désordre importants ou le renforcement de certains éléments de l'ossature (piles de ponts, poutres latérales) vis-à-vis de sollicitations accidentelles (chocs) telles que l'impact de véhicules [(Calgaro J, Lacroix R). 1997]. Notons que des tassements différentiels des fondations peuvent entraîner des fissurations.

1.2.4. Les dégradations dues aux attaques mécaniques

- **LES CHOCS**

Les désordres induits par l'exploitation d'un ouvrage constituent une cause non négligeable de dégradation du béton. Il s'agit le plus souvent d'action accidentelle de type mécanique qui se concrétise par des chocs [Calgaro J. et Lacroix R., 97]. Les chocs les plus fréquents sont ceux des poids lourds hors gabarit contre l'intrados des ponts, les chocs de bateaux ou d'objets flottants contre les piles en rivière (**Figure.I.8**). Ces chocs peuvent créer des épaufrures, des éclats important de béton, voir même des ruptures d'acier.



Figure. I.8 : Choc sur une pile de pont [Calgaro J. et Lacroix R., 97].

- **DELAMINATION**

L'action conjuguée des sollicitations climatiques, des sels anti-verglas et du trafic circulant directement sur le béton des hourdis de ponts a provoqué des délaminations du béton sur un nombre considérable d'ouvrages d'art. Dans les cas les plus graves, cette pathologie aboutit à la chute de plaque de béton et à la création de trous dans les tabliers de ponts (**Figure.I.9**).

D'autres types de pathologie peuvent être rencontrés dans les ouvrages en béton tel que celles dues aux erreurs de conception ou encore les erreurs d'exécution qui peuvent intervenir dès la fabrication du béton et se poursuivre jusqu'à la mise en service finale de l'ouvrage [**El Houssain Rochdi, 2004**].

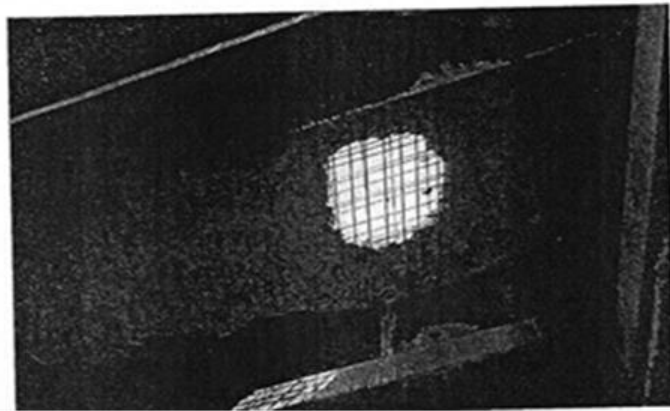


Figure. I.9 : Délamination du béton d'un hourdis de pont aboutissant à la formation d'un trou [El Houssain Rochdi, 2004].

I.3. Conclusion

En conclusion, les pathologies des structures en béton armé peuvent avoir diverses causes et conséquences sur la durabilité, la sécurité et la fonctionnalité des ouvrages.

Certaines pathologies courantes comprennent la corrosion de l'armature, les fissures, le fluage et le retrait, les déformations excessives, les infiltrations d'eau et les problèmes liés à la conception ou à l'exécution.

Ces pathologies peuvent résulter de divers facteurs tels que des erreurs de conception, des erreurs d'exécution, une exposition à des conditions environnementales agressives, une surcharge excessive, un manque d'entretien approprié ou une utilisation inadaptée des structures. Les conséquences peuvent aller de la réduction de la durée de vie de la structure à des problèmes de sécurité sérieux pouvant mettre en danger les occupants ou les utilisateurs. De plus, l'amélioration des pratiques de conception et de construction, l'utilisation de matériaux de qualité, l'application de normes et de réglementations rigoureuses, ainsi que la sensibilisation et la formation des professionnels de l'industrie sont des éléments clés pour prévenir et minimiser les pathologies des structures en béton armé.

La maintenance régulière et préventive est également essentielle pour détecter et corriger les problèmes potentiels à un stade précoce, avant qu'ils ne se transforment en problèmes majeurs.

Chapitre II

Techniques de réhabilitation des structures



II.1. Introduction

Le long de leur vie, les structures vieillissent et subissent des agressions diverses qui affectent inégalement les matériaux qui les constituent, sans qu'aucune n'échappe aux altérations, aiguës ou chroniques, qui les affectent inexorablement. C'est ainsi qu'on voit leur stabilité ou la santé de leurs matériaux remise en cause.

Afin de pouvoir faire des préconisations de solutions de réparation ou de prévention réalistes et durables, un diagnostic des désordres et une recherche des causes de dégradations doit être établi d'une manière précise.

Le renforcement des poutres à l'aide des plaques en acier ou en FRP stratifiées représente une récente technologie dans le domaine du génie civil. Cette technique a été un important sujet de recherches et les chercheurs ont montré qu'elle pourrait être une méthode très efficace dans les structures génie civil.

II.2. Les différentes techniques de réhabilitation

Le choix de la méthode de réparation et des matériaux à mettre en œuvre est défini en fonction de la nature et de l'importance des désordres constatés, en tenant compte des critères économiques des matériaux de construction, des conditions de chantier et des contraintes de site. Le principe de renforcement ou de réparation consiste en adjonction de matière dans les zones où les sections sont trop sollicitées. Une section devient trop sollicitée si, du fait même des dispositions adoptées ou du changement des conditions d'exploitations, les efforts appliqués sont supérieurs à ceux pris en compte dans les calculs (problème de renforcement), ou bien si la résistance a diminué par suite de dégradation (problème de la réparation). Il est possible de définir la maintenance comme l'ensemble des interventions qui ont pour but de prolonger la durée pendant laquelle l'ouvrage va procurer des avantages à la collectivité [(Llanoos J). 1992]. Parmi les interventions de maintenance, on peut distinguer :

- Les interventions qui visent à maintenir l'ouvrage à l'état neuf : ce sont les interventions d'entretien qui ont un caractère préventif.
- Les interventions qui améliorent l'état de l'ouvrage lorsque le processus de dégradation a déjà commencé : il s'agit des interventions de réparation et/ou de renforcement.

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

II.3.Méthodes de réparation non structurales

L'existence de fissures au niveau d'un élément structural peut entraîner des désordres grave s'ils ont sous-estimé, qui peut atteindre une perte de portance ou bien un

dysfonctionnement qui influe sur l'ensemble de la structure, la distribution déséquilibré des efforts contribuent à la dégradation du béton et l'apparition des armatures de ferrailages, donc un contact direct des armatures avec l'atmosphère provoquant sa corrosion, et là on est dans un état avancé de gravité, donc les méthodes de reprise de ce béton dégradé doivent être appliquées si l'on veut éviter d'avoir recours dans l'avenir à des techniques de réparation et/ou de renforcement plus onéreuses et parfois plus délicates à mettre en œuvre. Et dans le cas d'utilisation de méthodes plus lourdes, ces méthodes légères seront utilisées afin de restaurer un bon état de surface.

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

- préparation de la surface de béton à réparer,
- traitement des armatures éventuellement exposées,
- mise en œuvre d'un ou de plusieurs matériaux d'apport,
- protection du parement ainsi réparé.

II.4. Méthodes de réparation structurale

Les méthodes de réparation ou de renforcement structuraux des ouvrages en béton armé peuvent être effectués soit par ajout de forces (cas de la précontrainte additionnelle) [(**Godar B**). 1997], soit par ajout de matière (béton projeté, adjonction d'armature complémentaire et renfort collés (plaques d'acier ou composites)).

II.4.1. Réparation par précontrainte additionnelle

Le principe de cette technique est l'utilisation de câbles précontraints ou de torons gainés graissés pour donner une contrainte de compression à la partie tendue dans la section de la structure pour éliminer l'effet de la traction ou minimiser au moins.

Cette méthode est particulièrement adaptée au renforcement en flexion et vis-à-vis de l'effort tranchant par l'emploi d'étriers actifs (Figure II.1).

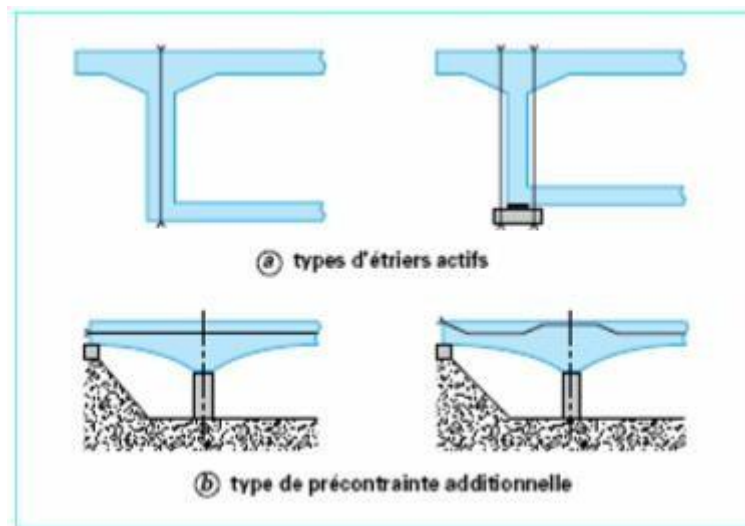


Figure II.1: Différents types de réparation par précontrainte additionnelle. [Ait Ameur Meziane.M.2008]

Cette méthode de renforcement bien que très efficace présente quelques difficultés de mise en œuvre [(Cussin F).1992]. En effet, elle nécessite de dimensionner soigneusement les ancrages et de déterminer le chemin approprié des câbles. Ainsi des forages à travers certaines parties de la structure existante sont nécessaires. Ces forages doivent être exécutés sans toucher aux différentes armatures existantes. Enfin il faut s'assurer que la précontrainte additionnelle se répartisse dans la structure et surtout dans les zones fissurées.

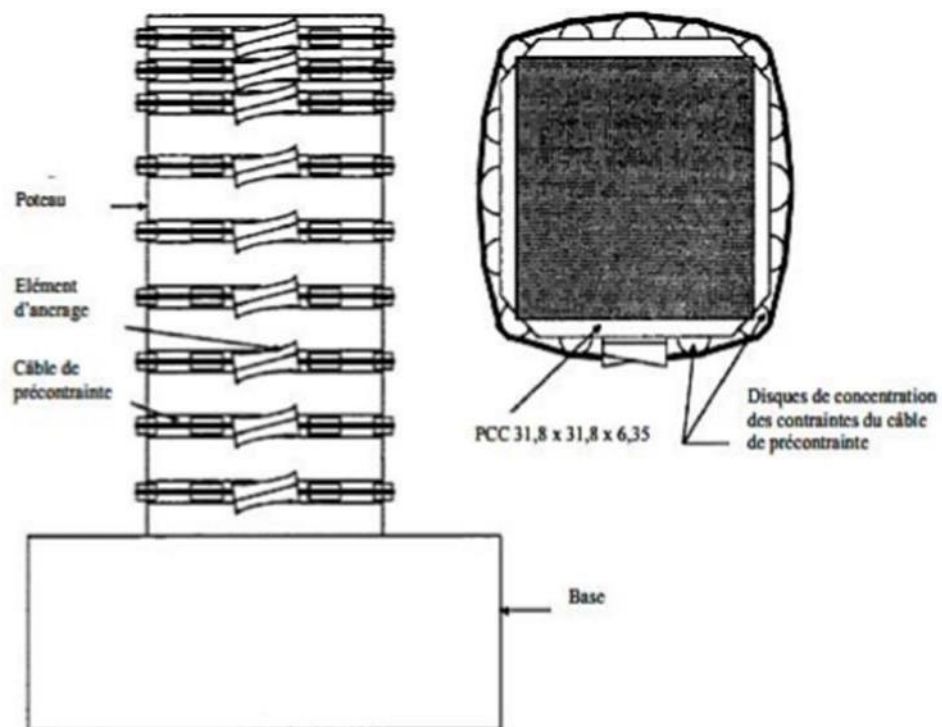


Figure II.2: Détail d'un renforcement d'un poteau carré par précontraintes additionnelles. [(Kherkhache S). 2013]

II.4.1.2. 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 (par exemple, pour réparer un bâtiment après un incendie), exige pour sa mise en œuvre un personnel spécialisé.

Cette technique consiste à projeter du béton convenablement dosé sur un support préalablement sablé. Sous l'effet de sa vitesse de projection et des accélérateurs de prise, ou raidisseurs, qui y sont inclus, le béton s'accroche très solidement sur le support et forme avec lui une structure homogène. 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 [(Resse C, Venaut M). 1981]. La projection est possible dans toutes les directions, en particulier en plafond Figure (I.9).

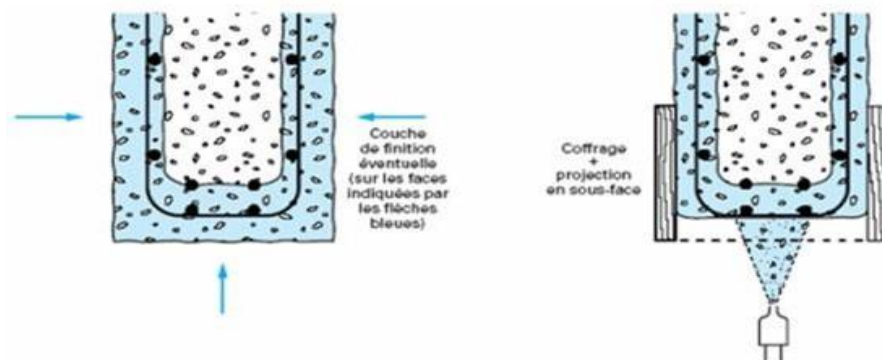


Figure II.3: Réparation de poutre par béton projeté. [(Resse C, Venaut M). 1981]

Les travaux de réparation par béton projeté se regroupent en deux catégories : 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 problèmes d'hygiène et de sécurité).

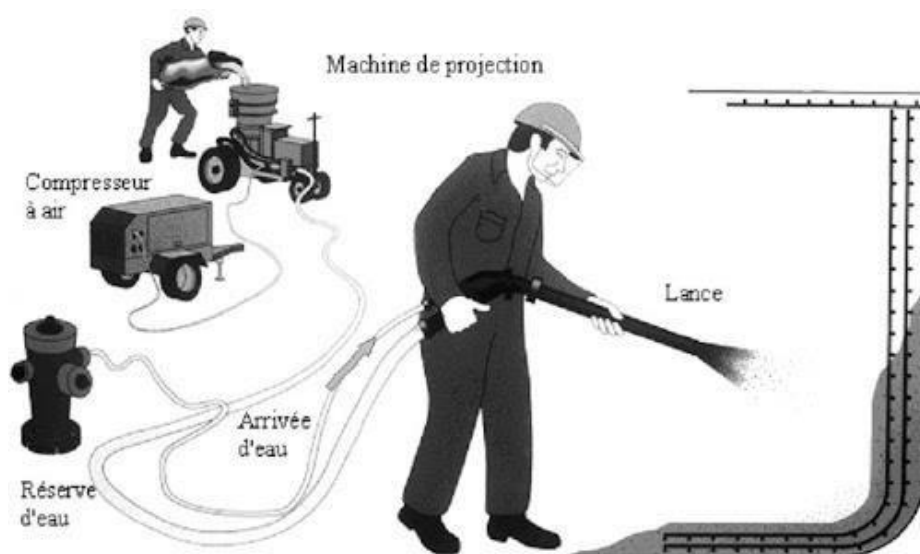


Figure II.4: renforcement au moyen de béton projeté en général

II.4.3. Réparation par adjonction d'armature complémentaire

Cette technique est basée sur l'ajout d'armatures pour remplacer l'acier corrodé ou renforcer la structure ; Ces armatures ajoutées traitent les fissures et contribuent à la résistance des sections renforcées nous protégeons le renforcement ajouté en partiellement par le couvrir par béton coulé ou projeté ; il y a une possibilité de lier les armatures anciennes et les nouvelles par le recouvrement ou la soudure. (*Figure II.5*).

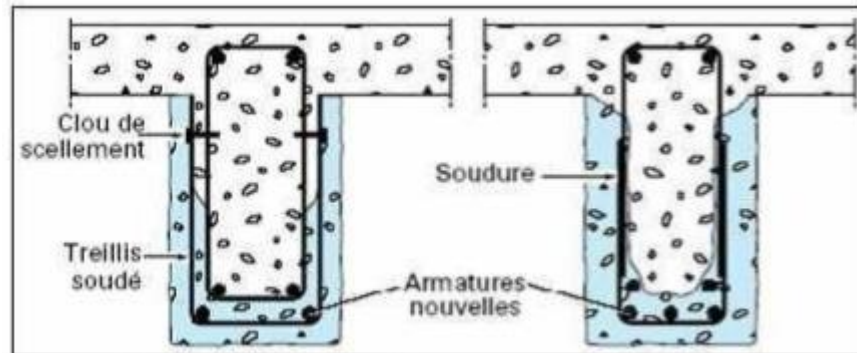


Figure II.5: Réparation de poutre par adjonction d'armature. [Ait Ameer Meziane.M.2008]

II.4.4. Renforcement par collage de plats métalliques

Le principe de cette technique est de relier la plaque d'acier à la surface du béton pour transférer les efforts et augmenter la résistance et la rigidité de la structure. Le renforcement de structure par plats métalliques, mieux connue sous le nom de procédé l'Hermite, consiste à coller des plats en acier sur les faces tendues de structures en béton armé. Ainsi, L'Hermite [(L'Hermite R). 1967] s'est intéressé, dès le début des années soixante, à l'utilisation de ces composés adhésifs de type époxy polymérisant à froid pour associer béton et acier.

D'après Theillout J.N [(Theillout J.N). 1997]. Trois problèmes mécaniques se posent lors de l'utilisation de tôles extérieures collées au béton pour le renforcement des structures.

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

L'acier de renfort est constitué dans la plupart des cas de tôle d'acier de nuance E24, d'épaisseur de 3 à 5 mm pour que l'adhérence entre l'acier et la colle ait une bonne tenue, les tôles utilisées doivent subir toute leur préparation en usine (découpage, sablage...).

La mise en place des tôles nécessite une très bonne préparation de chantier ainsi qu'une excellente coordination des équipes. Le collage impose un dispositif de serrage pouvant être un étaielement, un serrage par serre-joint ou un serrage par vérins plats. L'emploi de ce mode de réparation est particulièrement limité à cause de sa mise en œuvre difficile et onéreuse.

Ce procédé consiste en un apport d'armatures extérieures soit pour consolider un élément dont les dégradations mettent en péril la résistance, soit pour remplacer des aciers oubliés, ou mal positionnés. La préparation des surfaces, la mise en œuvre des colles, la réalisation du placage, etc., doivent impérativement être confiées à des entreprises spécialisées ou à des laboratoires du fait de la difficulté de la mise en œuvre de cette technique, certains procédés font d'ailleurs l'objet de brevets (ex. : brevet UTI-L'HERMITE, inventeur de la technique), **figure (II.6).**

La colle utilisée est, généralement, une résine époxyde. Son épaisseur est de 0,5 à 1 mm

Les tôles d'acier, de qualité courante, ont une épaisseur limitée à 3 mm.

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

- Sensibilité de l'acier à l'oxydation (il demande donc une protection et un entretien quotidien);
- Impossibilité de mobilisation de toute la résistance en traction des tôles, même sous faible épaisseur ;
- Nécessité d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine ;
- Impossibilité de généraliser cette technique à des surfaces importantes (masses manipulées trop importantes), ce qui limite d'autant les possibilités de réparation.



Figure II.6: Renforcement d'un viaduc par tôles collées. [(Boulaziz, A).2014],

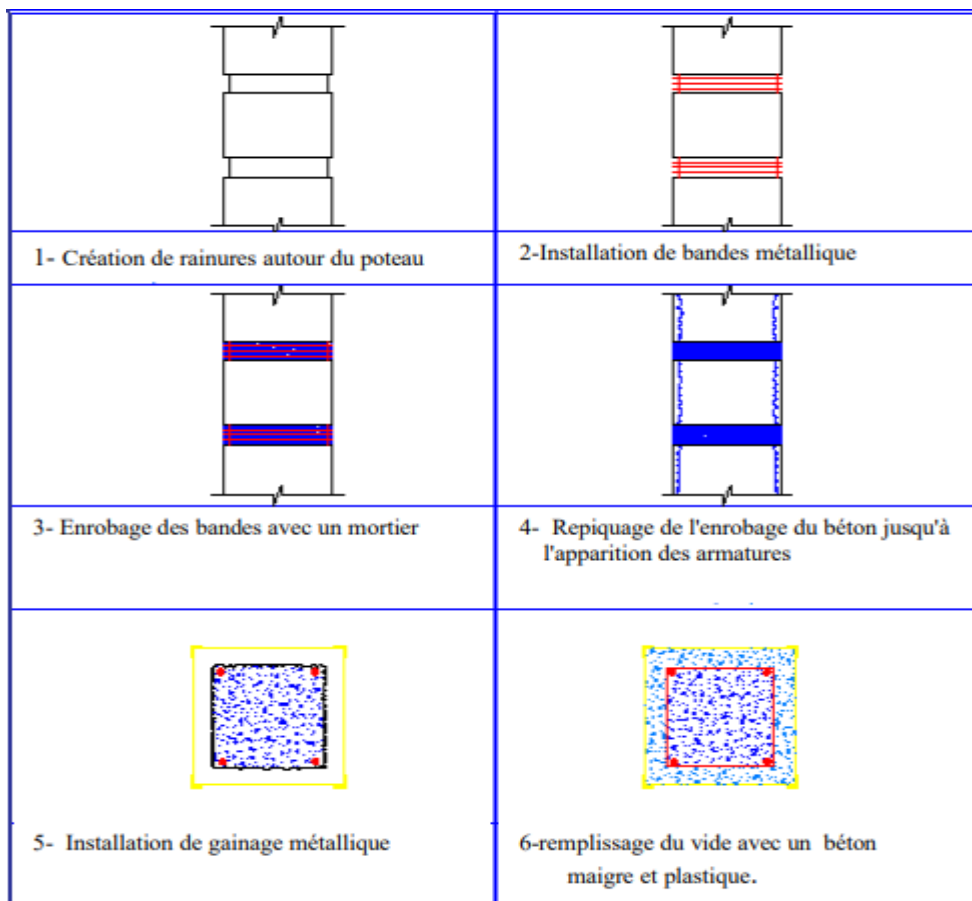


Figure II.7: Différents étapes renforcement d'un poteau par gainage métallique [(Belhannachi H).2009]

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients du tôle d'acier colle. [(NEZAR RAMZI).2018]

Avantage	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Courte durée de réalisation par rapport au chemisage en béton - Bonne performance des éléments renforcés (bonne ductilité) - Faible augmentation des section 	<ul style="list-style-type: none"> - Coûts relativement élevé - Nécessite de soudure donc une main d'œuvre qualifiée - Problème de corrosion ce qui nécessite uneface - Nécessite d'une préparation spécifique de la surface à traiter (la raideur des tôles nécessite une surface parfaitement plane pour assurer l'uniformité en épaisseur de l'adhésif). - Nécessite d'un collage sous pression (vérins) pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine de collage - Impossibilité de généraliser cette technique a des surfaces importantes (masses manipulées trop importantes). Ce qui limite d'autant les possibilités de réparation

II.4.5. Renforcement par collage des plats composites

Au début on a mentionné que les enjeux économiques ont été à l'origine de la prise de conscience de l'importance de la maintenance et ainsi au développement des techniques de renforcement et de réparation. Les techniques traditionnelles ont montré leurs limites au comportement à long terme (oxydation des tôles d'acier, durabilité du béton) l'amélioration de la durée de vie de l'ouvrage est due aux propriétés des matériaux composites

Un matériau composite est l'assemblage de deux matériaux de nature différente, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Les matériaux composites sont composés de fibres noyées dans une matrice.

Une fibre est constituée de plusieurs filaments, élémentaires doit le diamètre est de l'ordre de 5µm. La fibre a un comportement élastique linéaire jusqu'à rupture les lois de comportement sont de type "élastique fragile".

Le comportement mécanique des matériaux composite dépend du type de fibres et de type des matrices, qui doivent être compatibles entre eux.

La matrice est le matériau qui donne le monolithisme à l'ensemble, et permet d'assurer le collage des fibres entre elles et transférer les efforts extérieurs à celles-ci. De plus la matrice joue un rôle très important pour résister aux efforts tranchants Par ailleurs elle protège les fibres en les isolant de l'humidité de l'oxydation et des agents agressifs chimiques [(J.V.MIRANDA).2004].

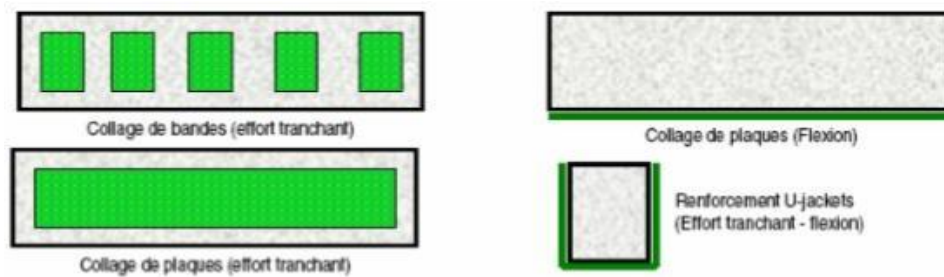


Figure II.8: Différentes méthodes de renforcement par le collage de plaques en composites [(Perrier R, et al) .1996].



Figure II.9: Mise en œuvre d'une réparation par matériaux composites. [(Amjad kreit).2012]

II.5. Application des matériaux composites pour la réparation et le renforcement des ouvrages en béton armé

Les situations de réparation et de renforcement par les matériaux composites étant diverses et variées, il est disponible pour la réhabilitation des ouvrages en béton armé, il faut donc déterminer un matériau composite adapté à chaque problème rencontré et sélectionner un adhésif qui garantira l'efficacité de la technique.



Ponçage de la surface



Découpage du tissu



Mise en place de la résine



Imprégnation du tissu

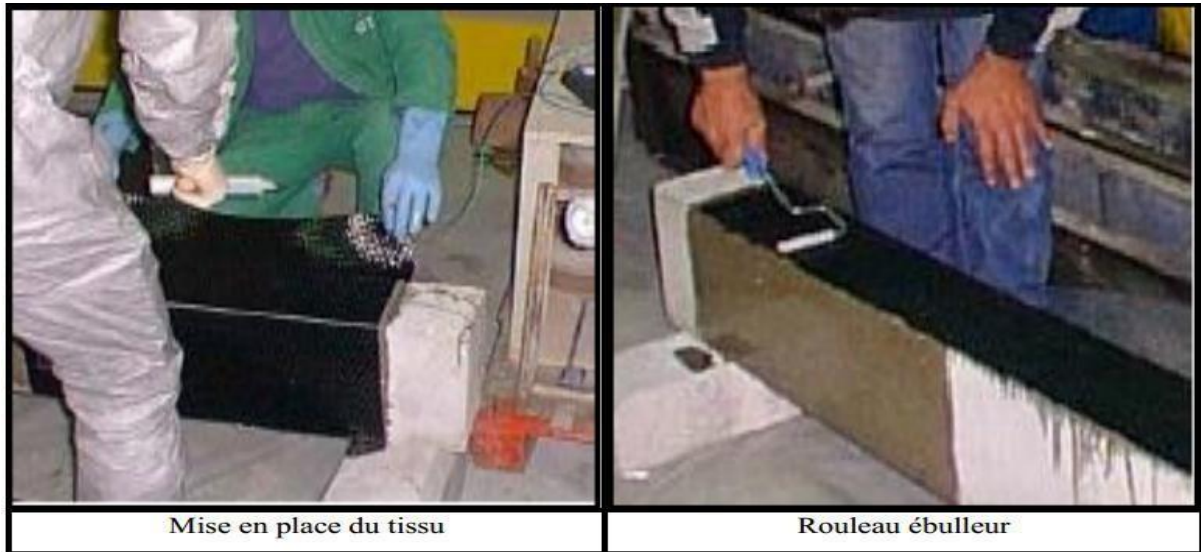


Figure II.10 : Mise en œuvre d'une réparation par stratification [Boulaziz.A.2014].

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.

Aujourd'hui, la recherche s'intensifie dans ce domaine, et les applications de ces matériaux dans le génie civil se diversifient.

La figure II.10 présente différentes configurations de collage de matériaux composites sur une poutre, chaque configuration est prévue pour un objectif particulier et la figure II.11 montre le renforcement de structures au moyen de composites préfabriqués Sika® CarboDur®.

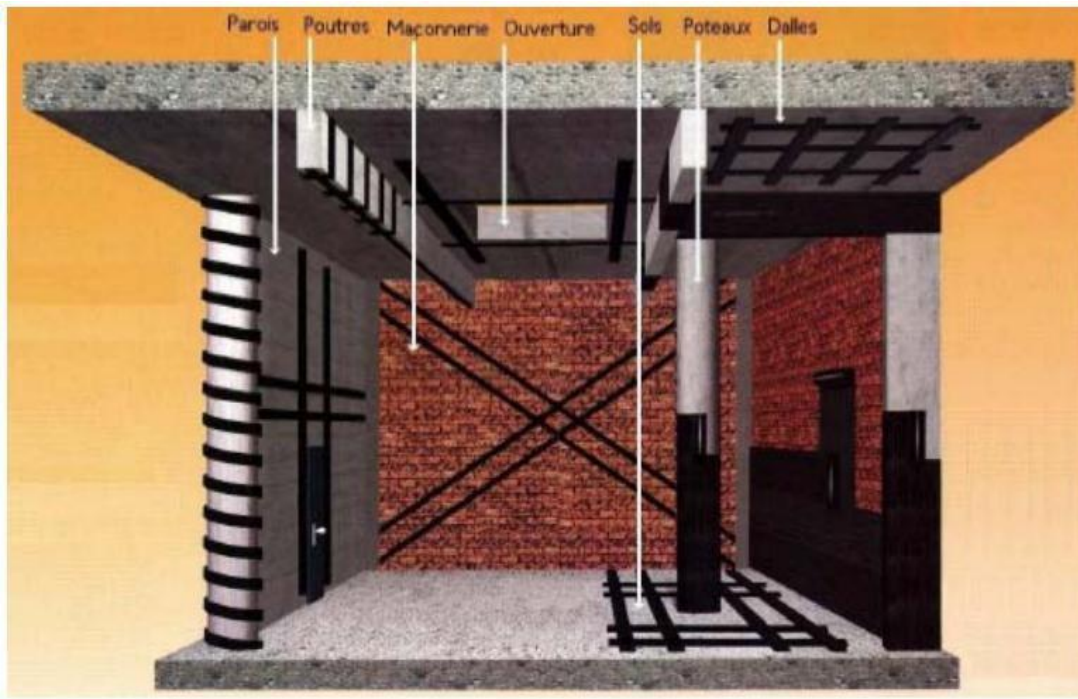


Figure II.11: le renforcement de structures au moyen de composites préfabriqués [Perrier R et Hamelin P. 1996].

II.6. Conclusion

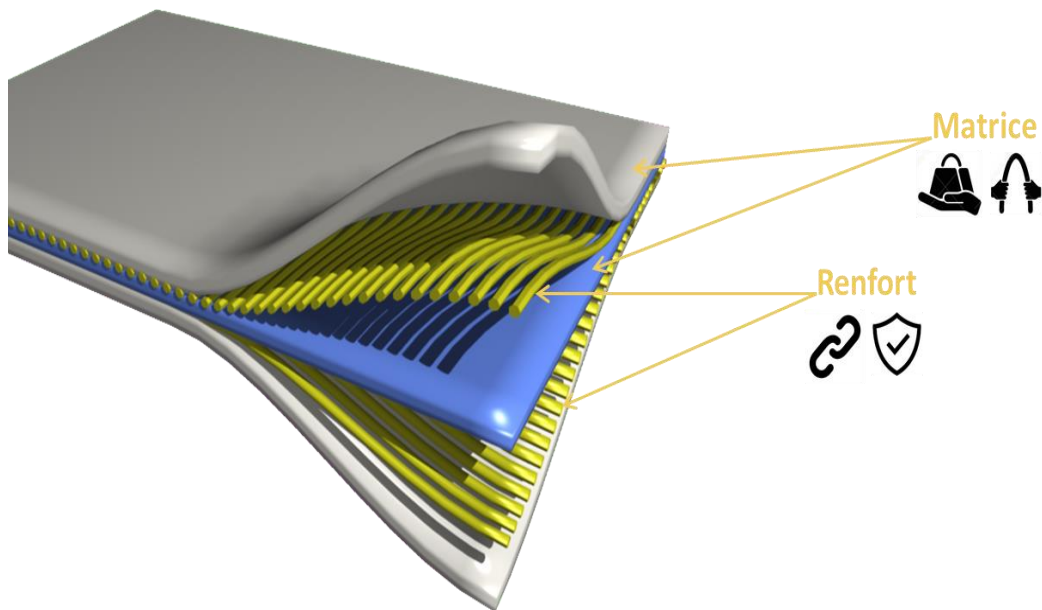
En conclusion, les techniques de réhabilitation des ouvrages en béton armé offrent des solutions fiables et durables pour prolonger la durée de vie des structures existantes.

Ces techniques permettent de restaurer la performance structurelle des ouvrages, d'améliorer leur résistance à la corrosion et de prévenir de futurs dommages.

Il est essentiel de choisir les techniques de réhabilitation appropriées en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque ouvrage et de travailler en étroite collaboration avec des professionnels du génie civil pour assurer la réussite des projets de réhabilitation.

Chapitre III

Généralité sur les matériaux composites



III.1. Introduction

Les matériaux composites stratifiés sont des matériaux qui résultent de la combinaison de différentes couches de matériaux distincts, chacun ayant des propriétés spécifiques, afin de créer une structure plus résistante et plus performante que chacun des matériaux pris individuellement. Ce type de matériau est largement utilisé dans de nombreux domaines tels que l'aéronautique, l'automobile, le génie civil et le secteur des sports et loisirs. La structure stratifiée est généralement composée de couches de matériaux, appelées renforts, et d'une matrice qui lie ces renforts ensemble. Les renforts peuvent être fabriqués à partir de différents types de fibres, tels que la fibre de verre, la fibre de carbone ou la fibre d'aramide (par exemple, le Kevlar), qui offrent une résistance et une rigidité accrues. La matrice, quant à elle, est généralement constituée d'un polymère tel que l'époxy ou le polyester, qui assure la cohésion des renforts et protège ces derniers contre les dommages. Les avantages des matériaux composites stratifiés résident dans leur combinaison unique de propriétés. Ils sont généralement plus légers que les matériaux traditionnels tels que l'acier ou l'aluminium, tout en étant plus rigides et plus résistants. Ils offrent également une excellente résistance à la corrosion, une bonne résistance aux impacts et une grande durabilité.

III.2. Définition du matériau composite

Un matériau composite peut être défini comme une combinaison de deux matériaux ou plus qui résulte par la formation d'un matériau dont les performances mécaniques, thermiques, électriques et physico-chimiques améliorées. Contrairement aux alliages métalliques dont chaque matériau retient ses propriétés physiques et mécaniques. Le matériau composite est constitué d'un renfort, qui contribue aux propriétés mécaniques de la pièce, et d'une matrice, le rôle de cette dernière est d'assurer la cohésion entre les éléments du renfort. La matrice permet de transférer les flux d'efforts entre les plis, de garantir la tenue à l'environnement

(Corrosion, vieillissement humide) et la tenue en température. Aujourd'hui, il existe une grande variété de matériaux composites qui peuvent être classés selon différents critères. [SAMIR BRAIRI, 2019].

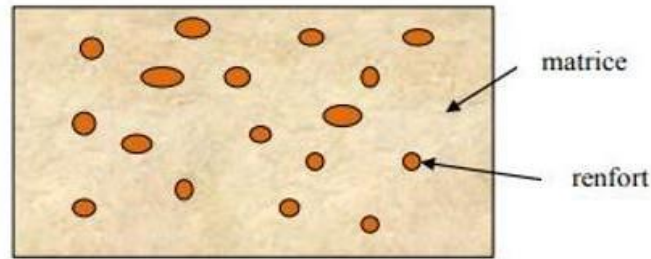


Figure III.1: Matériau composite.

III.2.1. La matrice

Pour des raisons de facilité de mise en œuvre sans pression, ce sont les polymères transformés à l'état liquide qui ont été initialement choisis pour servir de matrices et qui continuent à être le plus souvent employés. Aussi on trouve des matrices en métaux, en céramique ou en carbone selon le domaine d'utilisation. Les objectifs de l'utilisation de la matrice sont multiples, les plus importants sont :

- Support et protection chimique des fibres ou particules ;
- Répartition et transfert de charges.
- Donner la forme désirée au produit final. [HASSAINE.MOHAMED, 2015]

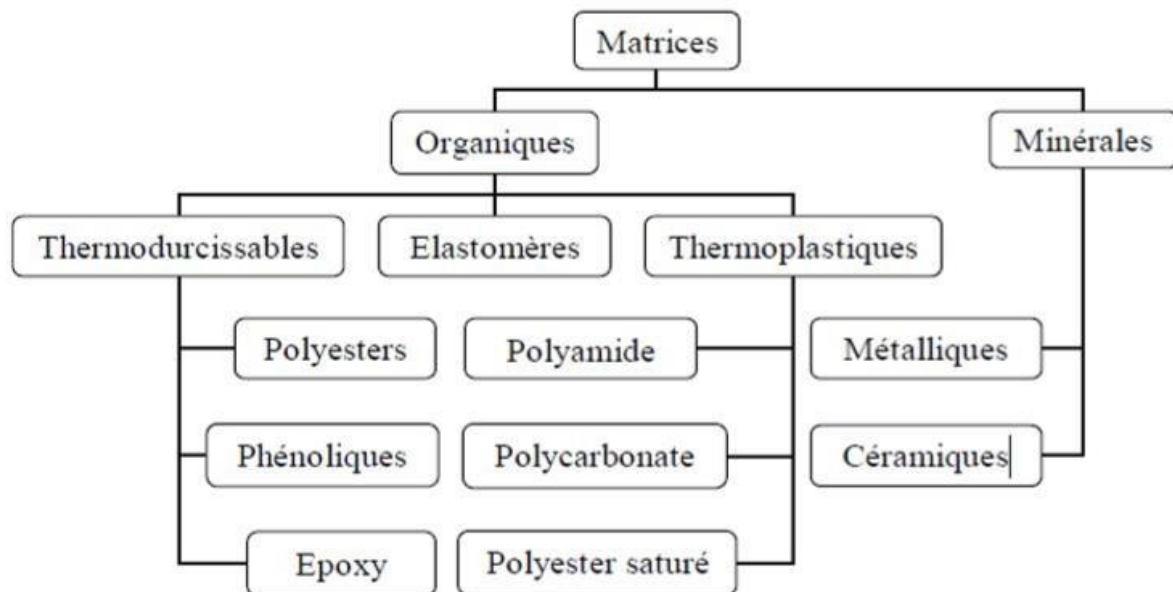


Figure III.2: Les différents types des matrices [SAMIR BRAIRI, 2019].

III.2.1.1. Les matrices minérales

L'utilisation de matériaux composites à des températures supérieures à 3000 °C interdit pratiquement l'usage des matrices organiques et suppose donc que l'élément de renforcement

soit noyé au sein d'une matrice métallique. Les plus employées sont les métaux légers et leurs alliages en particulier l'aluminium, le titane et le nickel. [BELBLIDIA Salima, 2018].

a) Matrices métalliques

L'utilisation des matrices métalliques est encore actuellement en grande partie à un stade préindustriel. Plusieurs matériaux composites tels que, l'aluminium et ses alliages, Nickel, Titane, présentent une bonne conductibilité électrique, une bonne tenue à des CHAPITRE III| Généralité sur les matériaux composites 36 températures élevées et de plus ils possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques transverses. Leur fabrication conduit à des coûts très élevés. [Laarej.Merad, 2010].

b) Matrices céramiques

Les matériaux utilisés sont les carbures de silicium et de carbone. Ils sont utilisés pour la fabrication des pièces qui subissent des contraintes d'origine thermique et leur coût est très élevé. [Laarej Merad 2010].

III.3.1.1 Les matrices organiques

Un très grand nombre de matériaux plastiques peut être utilisé comme matrice dans les matériaux composites. Elles peuvent aussi bien appartenir à la famille des résines « Thermodurcissables » qu'à celles des résines « thermoplastiques ». [BELBLIDIA Salima, 2018].

a) Les résines thermoplastiques

Sont des polymères à chaînes monodirectionnelles ou bidirectionnelles. Elles sont généralement fusibles et solubles. L'avantage de ces résines consiste à pouvoir être alternativement ramollies par chauffage et durcies par refroidissement ce qui facilite leur moulage par viscoplasticité. Cette transformation est réversible, permettant donc le recyclage de ce matériau. Renforcées par des fibres longues ou courtes, l'utilisation de ces résines se développe fortement et notamment comme matrice des composites "structuraux". [SAMIR BRAIRI, 2019].



Figure III.3: Résines thermoplastiques. [SAMIR BRAIRI, 2019].

b) Les résines thermodurcissables

Sont les produits les plus utilisés comme matrice de matériaux composites "structuraux". Généralement associées avec des fibres longues, elles sont liquides ou liquides visqueux et réticulent sous l'action thermiquement activée d'un catalyseur et d'un durcisseur. La transformation est irréversible et forme un produit infusible et insoluble. [SAMIR BRAIRI, 2019].

Les résines thermodurcissables principalement utilisées dans la fabrication des matériaux composites sont :

- **Résine polyester** : présente un bon accrochage sur les fibres, un prix bas, mais un retrait important et une tenue réduite à la chaleur humide.
- **Résine phénolique** : ayant de moins bonnes propriétés mécaniques que les résines époxydes, elle n'est utilisée que lorsqu'il y a des exigences vis-à-vis de tenue au feu.
- **Résine polyamide** : d'un emploi relativement difficile et cher, elle a l'avantage de garder des bonnes caractéristiques sur une large plage de température (de -100 à +260°C).
- **Résine époxyde** : (c'est la résine utilisée dans notre étude) les résines époxydes se présentent sous la forme de plusieurs ingrédients à mélanger : Une résine principale portant les terminaisons époxydes ; c'est un liquide plus ou moins visqueux ou un solide qui est, dans certaines conditions, soluble ou fusible.

- Un **diluant** réactif (avec des terminaisons époxydes, en général) ou non réactif (solvants organiques, en général); c'est un liquide très fluide, dont le rôle est d'abaisser la viscosité du système lorsque le mélange est effectué.
- Un **flexibilisant** réactif (avec des terminaisons époxydes, en général) ou non réactif ; c'est un liquide plus ou moins visqueux, dont le rôle est de rendre la résine durcie plus flexible.
- Un **durcisseur** portant les terminaisons chimiques qui réagissent sur les terminaisons époxydes des autres ingrédients pour constituer, en fin de cycle de polymérisation, un solide, c'est un liquide ou un solide (poudre, paillettes, blocs solubles ou fusibles).

La proportion de chaque produit entrant dans la composition du système de résine dépend des conditions de mise en œuvre à obtenir et des propriétés recherchées [RIGAL. J.C, NEGRIER. A, 2013].

Tableau.III.1: donne une comparaison entre les différentes résines [PERROT.Y, 2006].

	Polyesters	Phénoliques	Epoxydes	Polyamides
Caractéristiques Mécanique	Moyennes	Faibles	Très bonnes	Excellentes
Tenue aux chocs	Très bonne	Très faible	Bonne	Très bonne
Tenue en fatigue	Faible	Faible	Moyenne	Bonne
Pouvoir adhésif	Moyen	Moyen	Très bon	Très bon
Température Maxi d'utilisation	140°C	130°C	190°C	260°C
Tenue au feu	Mauvaise	Bonne	Moyenne	Très bonne
Retrait	Important	Faible	Très faible	Très faible
Duré de polymérisation	Courte	Courte	longue	Moyenne
Mise en œuvre	Très facile	Difficile	Facile	Difficile

c) Les élastomères

Sont des polymères synthétiques ou naturels dont la structure particulière confère une importante élasticité (Jusqu'à 500 % d'allongement par rapport à la taille initiale). À titre d'exemple, nous citons : les polyuréthanes, les silicones d'élastomères, le latex, le néoprène...etc.



Figure III.4 : Exemples d'élastomère [SAMIR BRAIRI, 2019].

d) Les adhésifs

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 adhésivité. [BELBLIDIA Salima, 2018].

II.2.2. Le renfort

Le renfort est tout simplement le squelette ou l'armature du composite, il confère aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture dureté. etc. Il permet aussi d'améliorer certaines des propriétés physique, comportement thermique, tenue en hautes températures, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques [B. Agoudjil 2008].

Parmi ses renforts on peut citer :

❖ Fibres

Les fibres sont des éléments du matériau composite qui apportent généralement les propriétés mécaniques recherchées. Elles se présentent sous forme de filaments de plus, au moins longs. Les fibres se présentent sous diverses formes commerciales :

- Linéiques (fils, méches,...etc)
- Tissus surfaciques (tissus simples, mats,..etc)
- Multidirectionnelles (tresses, tissus complexes,etc)

Il existe également des fibres courtes de 1 à 3mm qui sont dispersées dans la matrice, ou encore des fils coupés de 15 à 50mm de longueur. Leur utilisation est encore limitée en raison des difficultés de fabrication [B. Agoudjil, 2008]. Les principales fibres sont :

✚ Fibres de verre

Les fibres de verre sont obtenues à partir de silice et d'additifs. Le verre est coulé en fusion a 1.250°C à travers une filière en platine-rhodium, après refroidissement, les filaments sont étirés pour obtenir des fibres continues [B. Agoudjil, 2008].

Les caractéristiques majeures de ces fibres de verre sont répertoriées dans le tableau III.2



Figure III.5 : Fibre de verre. [BELBLIDIA Salima, 2018].

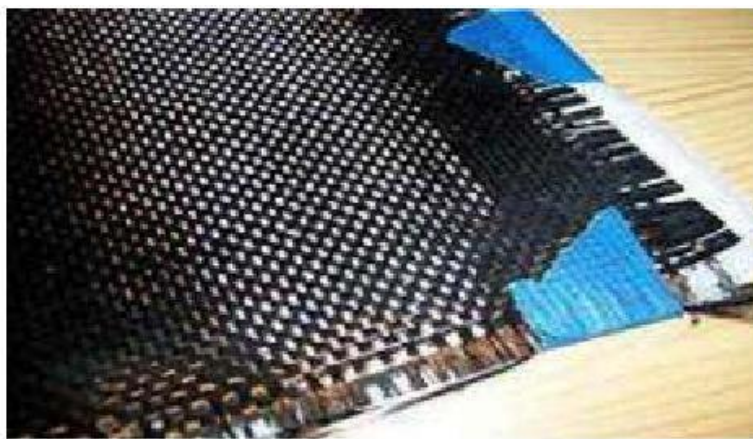
Tableau.III.2 : Différents types de fibres de verre. [B. Agoudjil, 2008].

Type	Caractéristiques générales
A	Haute teneur en alcali
B	Bonne résistance chimique
C	Hautes propriétés diélectriques
D	A usage général ; bonne propriétés électriques
R, S	Haute résistance mécanique

✚ Fibre de carbone

Les fibres de carbone ont la structure du graphite. Elles proviennent de fibre acrylique et du brai. Actuellement, il existe deux procédés de préparation de la fibre de carbone : l'une des voies permet d'obtenir les fibres de types HM (Haut Module) et THM (Très Haut Module), l'autre donne les fibres HR (Haute Résistance) et HT (Haute Ténacité). Une étape de graphitisation, réalisée après les étapes d'oxydation et de carbonisation, dans le procédé de préparation des fibres HM et THM différencie les deux voies. La graphitisation permet d'obtenir les fibres HM et THM.

La figure III.6 montre une fibre de carbone qu'on trouve dans de nombreuses applications dans l'aéronautique, le spatial ainsi que les sports et loisirs de compétitions. Le prix de ces fibres reste relativement. Les modules d'élasticité de ces fibres sont de quelques centaines de Gpa. [Toufik achour, 2011].

**Figure III.6: Fibre de carbone. [Toufik achour, 2011].**

✚ Les fibres de bore

Obtenues par dépôt chimique de chlorure de bore (BCI) et de l'hydrogène (H₂) sur un fil de tungstène de diamètre 13m chauffé à une température comprise entre 1100 et 1300°C par effet joule. [Toufik achour, 2011].

○ *Les fibres de carbure de silicium*

Le principe d'élaboration est analogue à celui de bore, le dépôt résulte de la décomposition, chimique à 1200°C du méthyltrichloros en présence d'hydrogène. [Toufik achour, 2011].

○ *Les fibres d'aramide (kevlar)*

Ce sont des polyamides des aromatiques dont la structure est composée de noyaux benzéniques reliés par des groupes CO et HN. [Toufik achour, 2011].

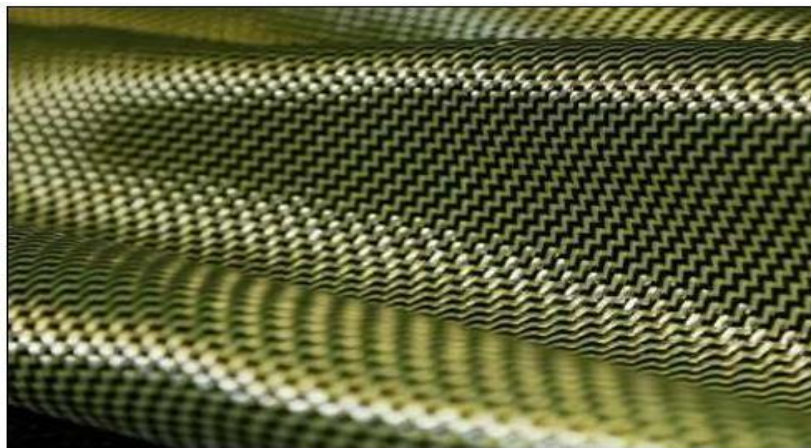


Figure III.7: Tissue en fibre d'aramide (Kevlar) [SAMIR BRAIRI, 2019].

III.3. Avantages et inconvénients de matériaux composites

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à :

- Leur légèreté
- Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue
- Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants.
- Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit.

- Ils sont insensibles aux produits chimiques tels que les huiles, les liquides hydrauliques ...
- On peut créer des matériaux de toutes les formes et de toutes les épaisseurs, en fonction de la demande.
- Ils se déforment moins en fonction de la température et de la pression ce qui est un des gros enjeux des matériaux utilisés en aviation commerciale. Ils sont peu sensibles à l'humidité, à la chaleur et à la corrosion ...
- Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion :
- Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.
- La gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.
- Ils sont beaucoup plus sensibles à tous les impacts. Une petite faille peut engendrer de grosses déformations.
- La détection de problèmes est difficile ce qui entraîne une rigueur extrême dans leur fabrication et dans leur assemblage.
- La mise en œuvre des réparations est beaucoup plus complexe. [B Guerira, 2005].

III.4. Domaine d'utilisation de composite dans le domaine de génie civil

III.4.1. Renforcement par composites collés (plats et tissus)

Les progrès réalisés ces dernières années dans la formulation des produits organiques de synthèse permettent de remplacer le renforcement à l'aide de tôles d'acier par le renforcement en utilisant les matériaux composites. Deux méthodes pour la confection des composites en fibres de carbone ont été employées. La première, qui est le plus généralement employé, consiste en l'application in situ de la résine sur une toile tissée (wet lay-up method) (**Figure III.8.a**) ou deux feuillets unidirectionnels (**Figure III.8.b**). La deuxième méthode est la préfabrication du composite dans des formes variées (**Figure III.8.c**). La première méthode est plus souple et permet la réparation sur les surfaces incurvées et déformées et même autour des coins, alors que la préfabrication permet un meilleur contrôle de qualité.

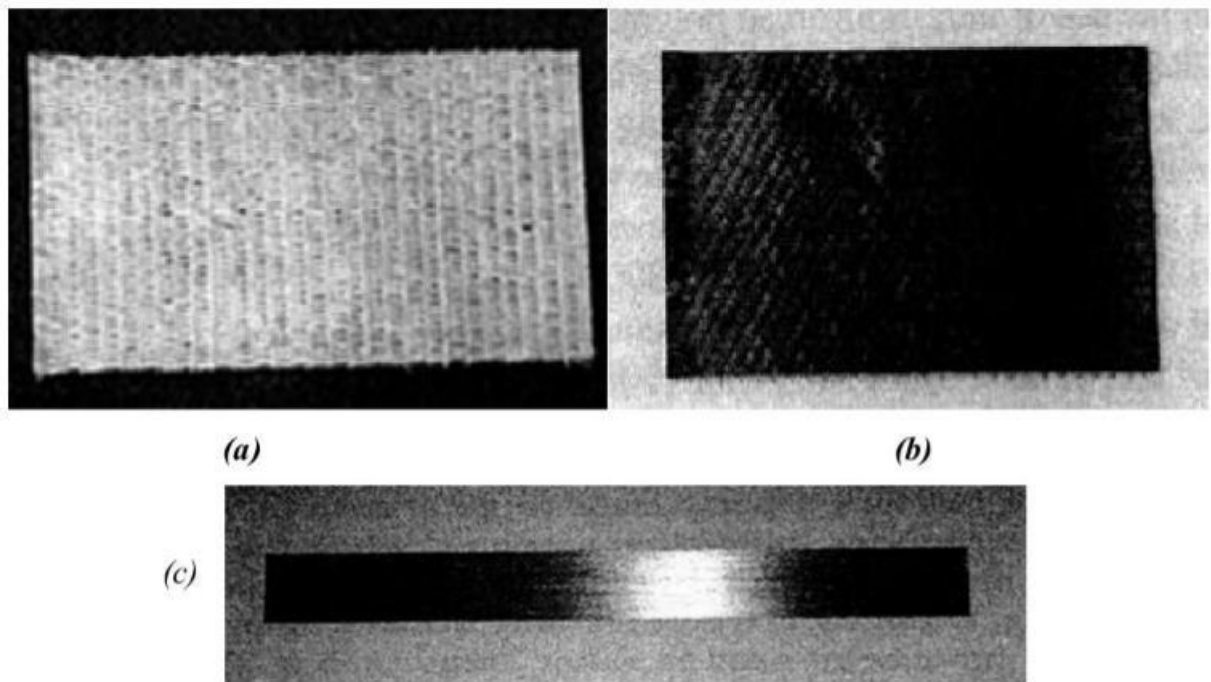


Figure III.8: Différents types de composite : (a) tissu de fibre de verre ; (b) deux feuillets de fibre de carbone ; (c) plat préfabriqué en fibre de carbone. [Cours MDC II]

Les principales applications de ce mode de renforcement portent sur le renforcement des poutres en béton vis-à-vis de la flexion et de l'effort tranchant et sur le renforcement ou le confinement de poteaux en béton armé (voir **Figure III.9**). [Univ Sétif Cours MDC II]

Les progrès réalisés ces dernières années dans la formulation des produits organiques de synthèse permettent de remplacer le renforcement à l'aide de tôles d'acier par le renforcement en utilisant les matériaux composites. Deux méthodes pour la confection des composites en



Figure III.9: Principales applications industrielles de renforts composites selon la technique EBR (External Bonded Reinforcements) poteau (confinement), renfort de poutre en flexion, et à l'effort tranchant. [Cours MDC II].

II.5. La théorie de la stratification des composites

III.5.1. Définition

La théorie de la stratification des composites est une approche mathématique utilisée pour modéliser le comportement mécanique des matériaux composites. Elle prend en compte la distribution des propriétés des matériaux à travers l'épaisseur du composite, en considérant que chaque couche du composite est homogène et isotrope. Selon cette théorie, chaque couche du composite est considérée comme un matériau homogène, ayant une propriété effective calculée en fonction de la proportion de chaque matériau constituant la couche.

Ces propriétés effectives sont utilisées pour modéliser le comportement mécanique global du composite. La théorie de la stratification des composites permet de prédire les propriétés mécaniques du composite, telles que la résistance à la traction, la flexion et la compression, en fonction de la composition et de l'agencement des couches composite.

Elle est utilisée pour concevoir des composites présentant des propriétés spécifiques pour des applications particulières, notamment dans l'aérospatiale, l'automobile, la construction et les sports. Cependant, il convient de noter que cette théorie est une simplification et ne tient pas compte de certains aspects importants du comportement mécanique des composites, tels que les effets de bord et les effets de tension-cisaillement.

Des approches plus avancées, telles que la modélisation par éléments finis, peut être nécessaires pour une prédiction plus précise du comportement des composites dans des situations complexes

III.6. Conclusion

Les matériaux composites sont une classe de matériaux qui se composent de deux ou plusieurs composants distincts, généralement appelés phases, qui sont combinés pour former une structure solide. Ces matériaux sont largement utilisés dans de nombreux domaines tels que l'aéronautique, l'automobile, la construction, le sport, et bien d'autres encore.

La principale caractéristique des matériaux composites est leur capacité à combiner les avantages de chaque composant individuel, tout en minimisant leurs inconvénients. Par exemple, les composites peuvent offrir une résistance élevée, une légèreté, une rigidité, une résistance à la corrosion, une conductivité thermique ou électrique, et d'autres propriétés spécifiques en fonction des besoins de l'application.

Chapitre IV

*Etude analytique des contraintes
d'interface d'une poutre console en
béton armée renforcée par
différents matériaux composites*

V.1.Introduction

Parmi les nouvelles techniques de construction, la réhabilitation des ouvrages existants au moyen des matériaux composites se présente comme une solution efficace pour parer certains phénomènes naturels. Nous avons visé comme objectif l'étude du phénomène de décollement de la plaque composite FRP en raison des contraintes d'interface élevées à la proximité du bord de la plaque collée dans une flexion par des matériaux composites. Ces dernières années, plusieurs travaux de recherche ont été effectués sur la méthode de réhabilitation. [Smith S.T and Teng J.G.2001], [Rabahi et al. 2021b], [Daouadji et al. 2021], {Abdedezak et al. 2018}, [Benyoucef et al. 2006], [Rabahi et al. 2020], [Hassaine Daouadji et al. 2020], [Rabahi et al. 2021a]. Dans la présente recherche, nous avons montré l'influence de l'endommagement d'une poutre console en béton armé sur l'évolution des contraintes d'interface composite / béton. Une méthode améliorée pour le calcul des contraintes d'interface a été développée.

La nature anisotropique des matériaux composites a été prise en compte dans l'analyse théorique en à travers l'épaisseur de la couche d'adhésif. Nous avons remarqué, à travers les résultats obtenus, que les contraintes d'interface maximales calculées par la présente méthode coïncident parfaitement avec ceux issues de la littérature.

V.2.Analyse théorique

Un élément infinitésimal de la poutre renforcée est illustré à la figure (IV.1) où les contraintes de cisaillement et les contraintes normales d'interface sont notées respectivement $\tau(x)$ et $\sigma(x)$. Le système est composé de trois matériaux : la poutre en béton, la couche d'adhésif et la plaque en composite.

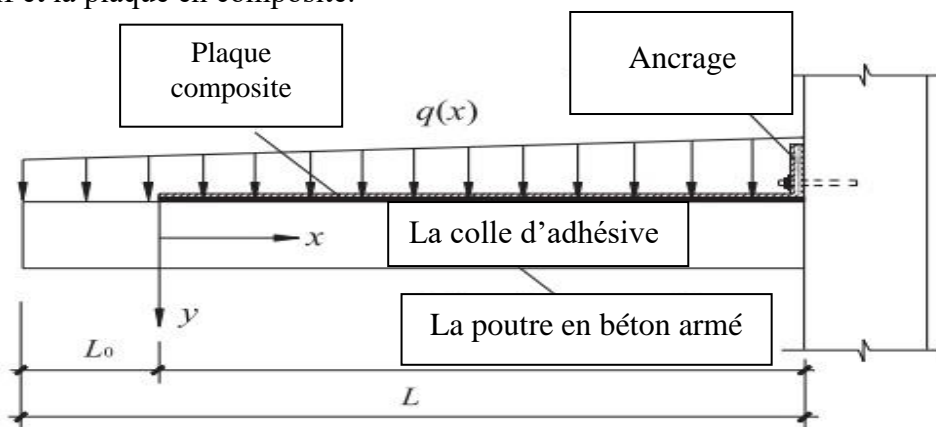


Figure IV.1 : Poutre console renforcée par des plaques en matériaux composites.

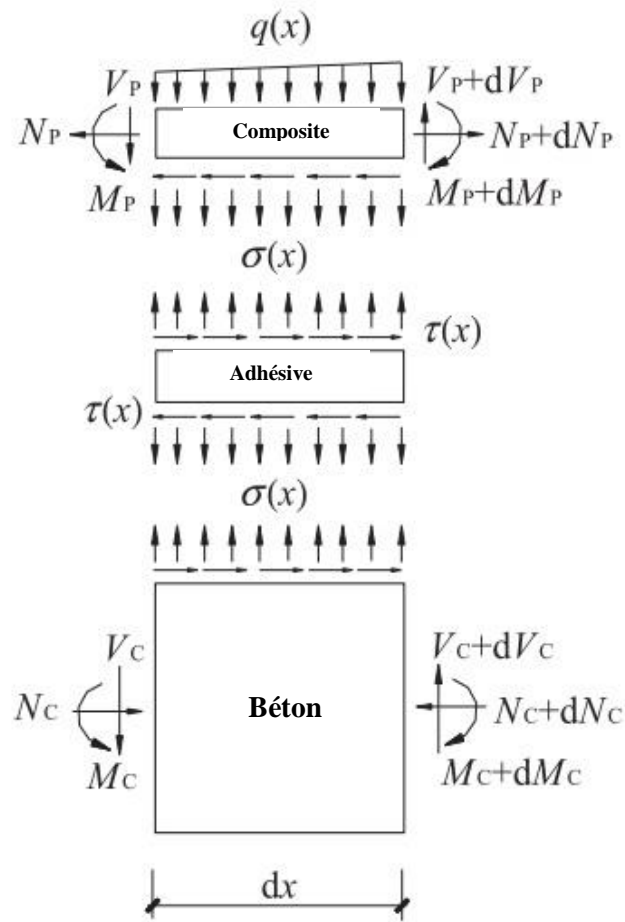


Figure IV.2 : Un segment différentiel de la poutre en béton renforcée par composite.

Dans la présente analyse, un comportement élastique linéaire est supposé pour les trois matériaux (béton, l'adhésif et la plaque composite). La couche d'adhésive est supposée jouer un rôle de transfert des contraintes du béton à la plaque composite avec des contraintes constantes à travers toute son épaisseur.

➤ *Les propriétés des matériaux endommagés*

[Mazard.1984] propose un modèle d'endommagement isotrope dans lequel la configuration d'énergie élastique de déformation pour une plaque endommagée est équivalente à la configuration d'énergie élastique de déformation pour une plaque non endommagée. Sur la base de cette hypothèse, les relations de constants élastiques d'état endommagé et d'état non endommagé peut être exprimé comme :

$$\bar{E} = E(1 - d) \quad \text{et} \quad 0 \leq d \leq 1 \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

\bar{E} : Les modules d'élasticité endommagée à calculer ;

E : Le module d'élasticité non endommagée du béton ;

d : Le variable d'endommagée varie entre 0 et 1.

➤ **Equations d'élasticité**

La déformation $\varepsilon_1(x)$ dans le béton au voisinage de la couche d'adhésive peut être exprimé par :

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{3G_1} \frac{d\tau_a}{dx} \quad (IV.2)$$

En se basant sur la théorie des plaques stratifiés, la déformation $\varepsilon_1(x)$ de la plaque composite au voisinage de la couche d'adhésive est donnée par :

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

Où $u_1(x)$ et $u_2(x)$ sont les déplacements horizontaux de la poutre en béton et la plaque composite respectivement. $M_1(x)$ et $M_2(x)$ sont respectivement les moments de flexion appliqués à la poutre en béton et la plaque composite ; E_1 est le module de Young du béton ; I_1 le moment d'inertie, e est la distance entre l'axe neutre à la fibre inférieure du béton, N_1 et N_2 sont les forces axiales appliquées au béton et à la plaque composite respectivement, b_2 et t_2 sont la largeur et l'épaisseur de la plaque de renforcement.

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

$$\text{Dans la direction x: } \frac{dN_1(x)}{dx} = -b_2 \tau(x) \quad (IV.4)$$

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

$$\text{Dans la direction y: } \frac{dV_1}{dx} = -[\sigma_n(x)b_2 + qb_1] \quad (IV.5)$$

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

$$\text{Le moment d'équilibre : } \frac{dM_1}{dx} = V_1(x) - \tau(x)b_2 \cdot y_1 \quad (\text{IV.6})$$

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

$$\text{Dans la direction x : } \frac{dN_2(x)}{dx} = b_2\tau(x) \quad (\text{IV.7})$$

$$\text{Dans la direction y : } \frac{dV_1}{dx} = \sigma_n(x)b_2 \quad (\text{IV.8})$$

$$\text{Le moment d'équilibre : } \frac{dM_2}{dx} = V_2(x) - \tau(x)b_2 \cdot y_2 \quad (\text{IV.9})$$

Où $V_1(x)$ est l'effort tranchant de la plaque de renforcement.

V.2.1. 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 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 :

$$\tau(x) = K_s \Delta u(x) = K_s [u_2(x) - u_1(x)] \quad (\text{IV.10})$$

Où K_s est la rigidité au cisaillement de la couche d'adhésive par unité de longueur. A partir de l'équation (IV.10) on peut en déduire l'expression de K_s qui est donnée par :

$$K_s = \frac{\tau(x)}{\Delta u(x)} = \frac{\tau(x)}{\Delta u(x)/t_a} \frac{1}{t_a} = \frac{G_a}{t_a} \quad (\text{IV.11})$$

$\Delta u(x)$ 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.10), (IV.2) et (IV.3) par rapport à x, et en négligeant le moment de flexion de la plaque composite nous aurons :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = K_s \left[\left(\frac{y_2}{E_2 I_2} M_2(x) + \frac{N_2}{E_2 A_2} - \frac{t_2}{3G_2} \frac{d\tau_a}{dx} \right) - \left(\frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{3G_1} \frac{d\tau_a}{dx} \right) \right] \quad (\text{IV.12})$$

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:

$$M_1(x) = RM_2(x) \quad (IV.13)$$

Avec :

$$R = \frac{E_1 I_1}{E_2 I_2} \quad (IV.14)$$

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

$$M_T(x) = M_1(x) + M_2(x) + N(x)(y_1 + y_2 + t_a) \quad (IV.15)$$

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

$$N(x) = N_1(x) = N_2(x) = b_2 \int_0^x \tau(x) dx \quad (IV.16)$$

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 :

$$M_1(x) = \frac{R}{R+1} \left[M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a) dx \right] \quad (IV.17)$$

$$M_2(x) = \frac{1}{R+1} \left[M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a) dx \right] \quad (IV.18)$$

En dérivant les expressions (IV.17) et (IV.18) nous aurons :

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

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = \frac{R}{R+1} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (IV.20)$$

En différentiant l'équation (IV.12) nous aurons:

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} = K_s \left[\frac{y_2}{E_2 I_2} \frac{dM_2(x)}{dx} + \frac{1}{E_2 A_2} \frac{dN_2(x)}{dx} - \frac{t_2}{3G_2} \frac{d^2 \tau_a}{dx^2} - \frac{y_1}{E_1 I_1} \frac{dM_1(x)}{dx} + \frac{1}{E_1 A_1} \frac{dN_1(x)}{dx} - \frac{t_1}{3G_1} \frac{d^2 \tau_a}{dx^2} \right] \quad (IV.21)$$

La substitution de l'effort tranchant (équations (V.19) et (V.20)) et l'effort normal (équations (V.16)) dans l'équation (V.20) nous permet d'obtenir l'équation différentielle des contraintes d'interface de cisaillement :

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} - K_1 b_2 \left(\frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} + \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right) \tau(x) + K_1 \left(\frac{(y_1 + y_2)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) V_T(x) = 0 \quad (IV.22)$$

Avec :

$$K_1 = \frac{1}{\left(\frac{t_a}{G_a} + \frac{t_1}{3G_1} + \frac{t_2}{3G_2} \right)} \quad (IV.23)$$

La solution de l'équation différentielle (équation (IV.22)) ci-dessus est donné par :

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sinh(\lambda x) + m_1 V_T(x) \quad (IV.24)$$

Avec :

$$\lambda^2 = K_1 b_2 \left(\frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} + \frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \quad (IV.25)$$

$$m_1 = \frac{K_1}{\lambda^2} \left(\frac{(y_1 + y_2)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \quad (IV.26)$$

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

$$\tau(x) = \left(\frac{q}{2\lambda} \cdot e^{-\lambda x} \right) (2.m_1 + m_2 \cdot a^2) + m_1 \cdot q \cdot (a + x) \quad (IV.27)$$

$$m_2 = \frac{K_1 y_1}{E_1 I_1} \quad (IV.28)$$

V.2.2. La distribution des contraintes normales dans l'interface composite – béton

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

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

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

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

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

En dérivant l'équation (IV.29) deux fois il en résulte :

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

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

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

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

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

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

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

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 :

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

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 :

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

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

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

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

Les constantes d'intégration C_1 et C_2 sont données par :

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

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

Ou :

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

V.3. Validation du modèle

Pour cela, une poutre console en béton armé endommagée réparée par différents types de composites est analysée. La poutre, ayant une travée de 1500 mm, soumise à une charge uniformément répartie d'une valeur de 30 KN/m. La distance de l'appui au bord de la plaque de renforcement (L_0) est de 500 mm. Les caractéristiques physiques et les propriétés mécaniques des matériaux utilisés sont rapportées au tableau (IV.1).

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

Matériaux	Largeur	Hauteur	Module de Young
Poutre en béton	$b_1 = 200$ mm	$t_1 = 300$ mm	$E_1 = 30\ 000$ MPa
Adhésif	$b_a = 100$ mm	$t_a = 2$ mm	$E_a = 3\ 000$ MPa
CFRP	$b_2 = 100$ mm	$t_2 = 4$ mm	$E_2 = 140\ 000$ MPa

IV.3.2. Validation du modèle

La méthode est validée en comparant les résultats de contraintes interraciales avec ceux obtenus à partir des méthodes de RABAHI. Les résultats obtenus par cette méthode sont cohérents avec ceux obtenus par cette méthode, comme le montre la figure IV.3

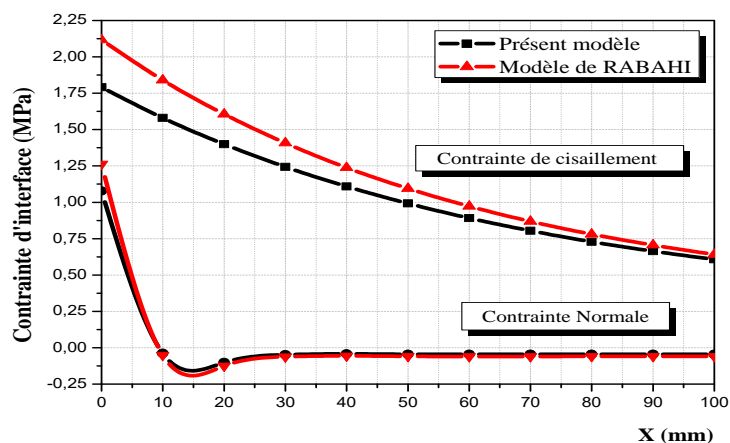


Figure IV.3: Validation de la présente méthode en comparant avec la méthode de RABAHI

IV.4. L'étude paramétrique

IV.4.1. Effet de la longueur non renforcée (a)

L'effet de la longueur a sur les contraintes d'interface maximales d'une poutre console endommagée (d = 0.1) réparer par composite stratifiée est illustré à la figure (IV.4) et tableau (IV.2) pour une orientation des fibres est égal à zéro pour toutes les couches. On constate qu'à mesure que la longueur « a » augmente, les contraintes d'interface maximales augmentent significativement.

Tableau IV.2 : L'influence de la longueur non renforcée (a) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en BA réparée par composite en CFRP.

	a (mm)	0/0/0/0		0/90/0/90		45/90/45/90		45/45/45/45	
		Contrainte de cisaillement	Contrainte Normale	Contrainte de cisaillement	Contrainte Normale	Contrainte de cisaillement	Contrainte Normale	Contrainte de cisaillement	Contrainte Normale
D = 0	0	0,0118	0,0070	0,0050	0,0056	0,0012	0,0036	0,0024	0,0045
	100	0,0403	0,0234	0,0235	0,0253	0,0102	0,0307	0,0150	0,0277
	200	0,0924	0,0524	0,0597	0,0633	0,0301	0,0901	0,0414	0,0756
	300	0,1681	0,0941	0,1136	0,1136	0,0608	0,1816	0,0816	0,1483
	400	0,2673	0,1485	0,1853	0,1944	0,1025	0,3055	0,1356	0,2458
	500	0,3901	0,2156	0,2748	0,2874	0,1550	0,4615	0,2033	0,3679
D = 0,05	0	0,0120	0,0072	0,0052	0,0057	0,0012	0,0037	0,0024	0,0046
	100	0,0403	0,0234	0,0234	0,0252	0,0101	0,0304	0,0149	0,0275
	200	0,0917	0,0520	0,0590	0,0627	0,0297	0,0888	0,0409	0,0747
	300	0,1662	0,0931	0,1121	0,1121	0,0599	0,1788	0,0804	0,1462
	400	0,2638	0,1466	0,1826	0,1915	0,1008	0,3003	0,1334	0,2418
	500	0,3844	0,2125	0,2704	0,2829	0,1523	0,4534	0,1999	0,3617
D = 0,1	0	0,0123	0,0073	0,0053	0,0058	0,0012	0,0037	0,0025	0,0047
	100	0,0403	0,0234	0,0233	0,0252	0,0100	0,0302	0,0148	0,0274
	200	0,0910	0,0910	0,0584	0,0621	0,0292	0,0875	0,0404	0,0738
	300	0,1642	0,0920	0,1105	0,1165	0,0589	0,1758	0,0791	0,1439
	400	0,2601	0,1446	0,1797	0,1885	0,0990	0,2949	0,1311	0,1311
	500	0,3785	0,2093	0,2659	0,2781	0,1495	0,4450	0,1963	0,3553
D = 0,15	0	0,0126	0,0075	0,0054	0,0060	0,0012	0,0038	0,0025	0,0048
	100	0,0404	0,0234	0,0232	0,0251	0,0099	0,0299	0,0147	0,0272
	200	0,0902	0,0513	0,0577	0,0614	0,0288	0,0862	0,0398	0,0728
	300	0,1622	0,0909	0,1089	0,1148	0,0578	0,1727	0,0778	0,1415

400	0,2562	0,2562	0,1767	0,1854	0,0971	0,2893	0,1287	0,2335
500	0,3723	0,2060	0,2611	0,2732	0,1465	0,4361	0,1926	0,3485

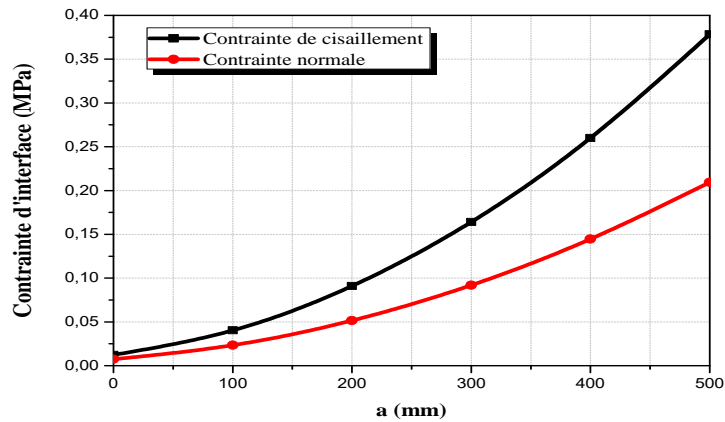


Figure IV.4: L'influence de la longueur non renforcée (a) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en BA réparée par composite en CFRP.

IV.4.2. Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive ta

Dans la figure (IV.5) et le tableau (IV.3), on présente l'effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive ta sur la variation des contraintes d'interface d'une poutre console endommagée ($d = 0.1$) réparée par composite stratifiée. On remarque que lorsque l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésive « ta » mène à une réduction significative des contraintes d'interface maximum.

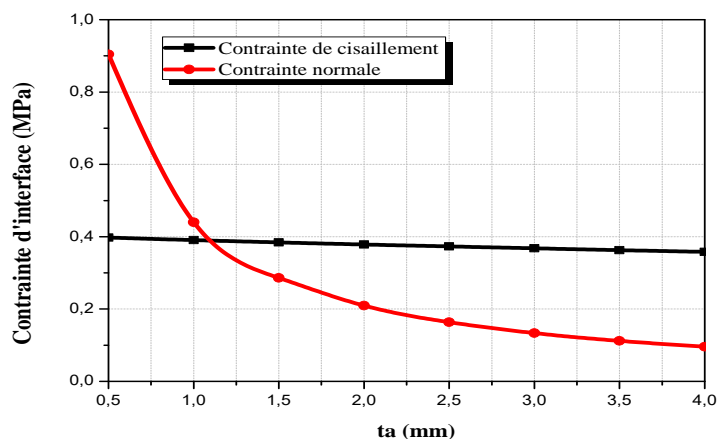


Figure IV.5: L'influence de l'épaisseur de la couche d'adhésive ta sur les contraintes d'interface pour une poutre console en BA réparée par composite en CFRP.

Tableau IV.3 : L'influence de la longueur non renforcée (*a*) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en BA réparée par composite en CFRP.

	a (mm)	0/0/0/0		0/90/0/90		45/90/45/90		45/45/45/45	
		Contrainte de cisaillement	Contrainte Normale	Contrainte de cisaillement	Contrainte Normale	Contrainte de cisaillement	Contrainte Normale	Contrainte de cisaillement	Contrainte Normale
D = 0	0,5	0,175	0,098	0,119	0,513	0,064	0,665	0,086	0,636
	1	0,173	0,097	0,117	0,250	0,063	0,324	0,085	0,310
	1,5	0,170	0,095	0,115	0,163	0,062	0,211	0,083	0,359
	2	0,168	0,094	0,114	0,120	0,061	0,154	0,082	0,148
	2,5	0,166	0,093	0,112	0,094	0,060	0,121	0,080	0,116
	3	0,092	0,092	0,110	0,077	0,059	0,059	0,079	0,337
	3,5	0,162	0,091	0,109	0,065	0,058	0,083	0,078	0,080
	4	0,161	0,090	0,108	0,055	0,057	0,071	0,077	0,069
D = 0,05	0,5	0,173	0,097	0,117	0,505	0,063	0,652	0,085	0,063
	1	0,171	0,095	0,116	0,247	0,062	0,318	0,083	0,305
	1,5	0,168	0,094	0,114	0,161	0,061	0,207	0,082	0,199
	2	0,166	0,093	0,112	0,118	0,060	0,060	0,080	0,146
	2,5	0,164	0,092	0,111	0,093	0,059	0,119	0,079	0,115
	3	0,163	0,091	0,109	0,076	0,058	0,097	0,078	0,094
	3,5	0,161	0,090	0,108	0,064	0,057	0,057	0,077	0,079
	4	0,159	0,089	0,106	0,055	0,056	0,070	0,076	0,068
D = 0,1	0,5	0,170	0,095	0,116	0,496	0,062	0,639	0,083	0,613
	1	0,168	0,094	0,114	0,243	0,061	0,312	0,082	0,300
	1,5	0,166	0,093	0,112	0,158	0,060	0,204	0,080	0,196
	2	0,162	0,092	0,111	0,117	0,059	0,149	0,079	0,144
	2,5	0,162	0,091	0,109	0,091	0,058	0,117	0,078	0,113
	3	0,161	0,092	0,108	0,075	0,057	0,096	0,077	0,092
	3,5	0,159	0,089	0,106	0,112	0,056	0,081	0,076	0,778
	4	0,158	0,089	0,105	0,054	0,055	0,069	0,075	0,067
D = 0,15	0,5	0,168	0,094	0,113	0,487	0,061	0,626	0,081	0,601
	1	0,166	0,093	0,112	0,239	0,060	0,306	0,080	0,294
	1,5	0,164	0,123	0,110	0,156	0,058	0,200	0,079	0,192
	2	0,162	0,091	0,109	0,115	0,058	0,147	0,078	0,331
	2,5	0,161	0,072	0,108	0,113	0,057	0,115	0,077	0,111
	3	0,159	0,159	0,106	0,074	0,056	0,094	0,076	0,091
	3,5	0,157	0,049	0,105	0,062	0,055	0,079	0,075	0,077
	4	0,156	0,043	0,104	0,054	0,055	0,068	0,073	0,066

V.4.3. Effet de la hauteur de la poutre t1

L'effet de la hauteur de la poutre t1 sur les contraintes d'interface maximales est présentées sur la figure (IV.6). Lorsque la hauteur de la poutre t1 augmente plus les contraintes

d'interface maximales (contraintes en extrémité de la plaque) diminuent d'une façon significative.

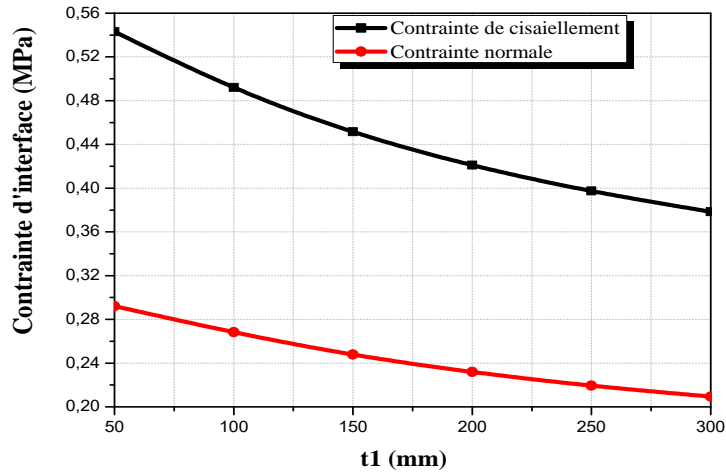


Figure IV.6: L'influence de la hauteur de la poutre $t1$ sur les contraintes d'interface pour une poutre console en BA réparée par composite en CFRP

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, une nouvelle analyse théorique des contraintes d'interface dans une poutre console en béton armé endommagées réparée par différents types de composites en variant l'orientation des fibres a été présentée.

L'évaluation de ces contraintes est la base de compréhension du phénomène de décollement qui est le mode de rupture fréquent chez les systèmes renforcés. Les résultats de la présente solution ont été validés par ceux obtenus par le modèle de RABAHI.

L'étude paramétrique, nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- 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.
- Le maximum des contraintes normales et de cisaillement diminue à mesure que l'épaisseur de la couche l'adhésif et la hauteur de la poutre augmentent.
- Prolonger le plus possible la longueur de la plaque de renforcement aux appuis, réduit les contraintes aux bords.

Conclusion générale

Conclusion générale

Durant leur vie les structures et les ouvrages en béton armé, soumis à des contraintes statiques, dynamiques et climatiques pouvant causer leur détérioration et leur endommagement.

Selon les différentes causes de désordres les opérations des maintenances des ouvrages consistent à les protéger en limitant leur corrosion, à les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance ou à les renforcer en améliorant leurs performances et leur durabilité.

Dans cette étude, nous avons modélisé les contraintes d'interface béton composite d'une poutre console en béton armé endommagée réparée par matériaux composites sous des charges de flexion. Cette recherche confirme et complète certains des points soulevés précédemment à ce sujet.

Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié, en se basant sur le développement de la méthode de [Mazard.1984] les contraintes d'interface au niveau de la couche d'adhésif d'une poutre endommagée réparée par matériaux composite.

L'influence des paramètres liés à la géométrie (longueur, épaisseur et largeur) de la plaque de renfort, l'épaisseur et la rigidité de la couche adhésive, la hauteur et la rigidité de la poutre et la fraction volumique des fibres. Afin de compléter cette étude paramétrique, afin de prouver l'influence de divers paramètres sur la répartition des contraintes d'interfaces dans les poutres composites en béton armé.

L'étude paramétrique, nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- 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.
- Le maximum des contraintes normales et de cisaillement diminue à mesure que l'épaisseur de la couche l'adhésif et la hauteur de la poutre augmentent.
- Prolonger le plus possible la longueur de la plaque de renforcement aux appuis, réduit les contraintes aux bords.

Référence bibliographique

[(**Deghmane Y, Riou O**).2018], Modélisation des contraintes de cisaillement et normale dans les poutres endommagées en béton armé réparé par composite en nid d'abeille,

[(**Hamelin p**).2002], AFGC recommendations concerning strengthening and repairing of Concrete structures with composite materials, AFGC/RILEM. Seminar on advances in Materials and structures, Bagnaux, France.

[(**Ferrier E**). 1999], Comportement de l'interface composite-béton sous des sollicitations de fluage thermostimulé et en fatigue oligocyclique. Application au calcul prévisionnel de la durabilité de poutre BA renforcées, Thèse de doctorat, Université Lyon 1.

[(**Venuat M**). 1989], La pratique des ciments mortier et béton, Moniteur technique, édition du moniteur, 89.

[(**Calgaro J, Lacroix R**). 1997], Maintenance et réparation des ponts, Presse de l'école Nationale des Ponts et Chaussées, p.92.

[(**Llanoos J**).1997], "La maintenance des ponts routiers, Approche économique ". Presse de l'école Nationale des Ponts et Chaussées.

[(**Godart b**).1997], "La réparation du béton dégradé, Maintenance et réparation des ponts".Chapitre 6, Presse de l'école Nationale des Ponts et Chaussées.

[(**Cussin F**).1992]. Tôles collées. Précontraintes additionnelles. Annales de l'ITBTP, 501, 85-88.

[(**Resse c. et Venuat M**). 1981], "Projection des mortiers béton et plâtres". Techniques et applications bâtiment et TP.

[(**Hermite R.L. et al**).1967], Concrete reinforced with glued plates, RILEM, International Symposium on synthetic resin in building constructions, p. 175-203.

[(**Theillout J.N**). 1997], Le Projet de renforcement ou de réparation des ponts en béton, Presse de l'Ecole Nationales des Ponts et Chaussées, 425-459

[(**J.V. MIRANDA**).2004], techniques et systèmes de renfort des structures en béton, Chamonix, France, pp.151-157.

[**SAMIR BRAIRI, 2019**]. ANALYSE DE LA DÉGRADATION DES STRUCTURES FGM RENFORCÉES PAR FRP PRÉCONTRAINS thèse Doctorat LMD en Génie mécanique université tlemcen.

[**HASSAINE.MOHAMED, 2015**]. RÉHABILITATION PAR LES FIBRES FRP DES STRUCTURES DÉGRADÉES mémoire de master en génie mécanique université belkaied tlemcen.

[**BELBLIDIA Salima, 2018**]. , Contribution à l'étude du comportement des poutres métalliques des ouvrages d'art renforcées par différents types de composite. mémoire de master université de Tiaret.

[**Laarej.Merad, 2010**]. , ETUDE PAR SPECTROSCOPIE RAMAN ET MODELISATION D'UNE RESINE COMPOSITE RTM.Thèse Ingénieur d'Etat diplômé de l'Université belkaied de Tlemcen.

[**RIGAL. J.C, NEGRIER. A, 2013**]. Présentation des matériaux composites», Éditions Techniques de l'Ingénieur, a7790, 2013.

[**B. Agoudjil 2008**]. Ibos, J. C. Majesté, Y. Candau, and Y. P. Mamunya, "Corrélation between transport properties of Ethylene Vinyl Acetate/glass, silver-coated glass spheres composites," Composite: Part A, 39, 342-351(2008).

[**Toufik achour, 2011**]. , étude des techniques de réparation des structures composites endommagées, mémoire de magister, Université mentouri constantine,8-20 (2011).

[**B Guerira, 2005**]. Généralités sur les matériaux composites sur <http://thesis.univbiskra.dz/2282/3/ChapI.PDF>. (2005).

[**J.M.BERTHELOT.2002**] « matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures, TEC et DOC 4ème édition ». Glossaire des matériaux composites, CARMA centre d'animation régional en matériaux avancés, 2006.

[**RABAHI. A, Daouadji, T.H. and Rabia, B. (2021)**] "Aluminum beam reinforced by externally bonded composite materials", Advan. Mater. Res., 10(1), 23. <http://dx.doi.org/10.12989/amr.2020.9.4.265>.