

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

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

GHLIB M'hamed

FERHAT Oussama

Sujet du mémoire

Analyse analytique des contraintes d'interface d'une poutre console en béton armé renforcée par matériaux composites

Soutenu publiquement le 27/09/2020 devant le jury composé de :

Mr, KERROUM Nadir

Président

Mr, RABAHI Abderezak

Rapporteur

Mr, KRIM Abdellah

Examineur

Mr, DJEBLI Benyagoub

Examineur

2019/2020

Remerciement

Pour certains, il peut avoir peu de valeur à leurs yeux, mais pour moi, si j'en suis arrivé là, c'est bien par la patience, la disponibilité, les précieux conseils des gens qui ont croisé mon chemin.

*Je remercie tout d'abord **ALLAH** qui m'a doté de la volonté, du courage et surtout de la patience pour produire cette recherche et qui m'a aidé à faire face à toutes les difficultés rencontrées lors de son élaboration.*

Je voudrais exprimer mes plus profonds remerciements à mes parents,... Ils sont à l'origine de tout ce que j'ai accompli de bien.

*Mes très sincères remerciements à mon directeur de mémoire **Dr. Mr Rabahi.A**, pour avoir assuré mon encadrement pour ce travail. Aussi pour la confiance et l'attention qu'il m'a accordées tout au long de ce travail, pour son écoute, son aide et son sens de la motivation m'ont été très utile pour mener à terme ce travail, pour ses grandes qualités pédagogiques.*

Je tiens à remercier tous les membres du jury qui ont bien voulu consacrer une partie de leur temps à examiner ce travail. Tous les enseignants qui ont contribué à ma formation durant ces années d'études. Enfin, plus que tous, Je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.

Dédicaces

*A ceux qui ont fait de moi ce que je suis et qui sont
toujours présents pour me soutenir tout moment.*

A tous les gens qui m'aimé

Sommaire

Liste des tableaux	IV
Liste des figures.....	V
Liste des notations	VII
Résumé	IX
Abstract.....	X
ملخص	XI
Introduction générale.....	XII
I.1. Introduction	1
I.2. Pathologies des ouvrages en béton armé.....	1
I.2.1. Pathologie d'origine chimique	1
I.2.2. Pathologie d'origine physique	4
I.2.3. Pathologie d'origine mécanique	6
I.2.4. Agressivité du milieu extérieur	8
I.3. Les différentes techniques de réhabilitation.....	9
I.3.1. Méthodes de réparation non structurales	9
I.3.2. Méthodes de réparation structurale	10
I.3.2.1. Réparation par précontrainte additionnelle	10
I.3.2.2. Réparation par béton projeté	11
I.3.2.3. Réparation par adjonction d'armature complémentaire.....	11
I.3.2.4. Renforcement par collage de plats métalliques	12
I.3.2.5. Renforcement par collage des plats composites	13
I.4. Application des matériaux composites pour la réparation et le renforcement des ouvrages en béton armé.....	14
I.5. Conclusion.....	17
II.1. Introduction.....	16
II.2. Définition des composites.....	16

II.3. Historique.....	18
II.4. Les différents composants de matériaux composites	19
II.4.1. La matrice	20
II.4.1.1. Les résines thermodurcissables	21
II.4.1.2. Les résines thermoplastiques	22
II.4.1.3. Les matrices métalliques	23
II.4.2. Les renforts	23
II. 5. Conclusion	27
III. 1. Introduction	29
III.2. Comportements des poutres en béton armé renforcées par des plaques en matériaux composites sous chargement statique.....	30
III. 2. 1. Comportement mécanique d'une section de poutre renforcée	31
III 2. 2. Mécanisme de rupture des poutres renforcées par matériaux composites	32
III.2.2.1. Rupture due à la flexion	32
III.2.2.2. Rupture due au cisaillement	32
III.2.2.3 Rupture due au décollement.....	33
III.2.3. Facteurs ayant une influence sur le comportement des poutres renforcées	34
III.2.3.1. Influence du rapport de la distance entre la charge et l'appui par rapport à la hauteur de la section (a_v / h)	34
III.2.3.2. Influence du taux de renforcement des armatures tendues	35
III.2. 3. 3. Influence de la longueur de la plaque composite	37
III.2. 3. 4. Influence de la quantité du composite.....	38
III.3. Conclusion.....	42
IV.1.Introduction	46
IV.2. Analyse mathématique	46
IV.2.1. La distribution des contraintes de cisaillement dans l'interface composite – Béton.....	49
IV.2.2. La distribution des contraintes normales dans l'interface composite – Acier	51

IV.3. Présentation du modèle étudié.....	53
IV.4. L'étude paramétrique	55
IV.4.1 Effet de la longueur non renforcée a	55
IV.4.2. Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive ta	56
IV.5. Conclusion.....	60
Conclusion générale	63
Référence bibliographique	

Liste des tableaux

Tableau II. 1: les différents types de composites 17

Tableau II.2:Caractéristiques des résines thermodurcissables 22

Tableau II.3. Caractéristiques des résines thermoplastiques..... 22

Tableau.II.4: Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques 23

Tableau II.5 : Propriétés des fibres de carbone 25

Tableau II.6: Propriétés des fibres de Verre 26

Tableau II.7 : Propriétés des fibres de Kevlar 26

Tableau II.8: caractéristique de fibres céramiques..... 27

Tableau III.1 : Influence de la longueur du renforcement sur la résistance ultime et le mode de rupture (ρ : taux de renforcement des armatures tendues)..... 38

Tableau III .2 : Influence de la quantité du composite sur la résistance ultime 39

Tableau.III.3: Influence du type d’ancrage sur la résistance ultime des poutres renforcées 41

Tableau IV.1 : Propriétés géométriques et mécaniques des matériaux. 53

Liste des figures

<i>Figure I.1: Processus de carbonatation</i>	2
<i>Figure I.2 : Poutre située en bord de mer sous de l'agression des chlorures</i>	2
<i>Figure I.4 : Fissurations de la poutre de pont provoquées par l'alcali-réaction</i>	4
<i>Figure I.5 : Corrosion des armatures métalliques</i>	4
<i>Figure I.6: Dégradation par choc</i>	5
<i>Figure I.7 : Fissurations excessives de deux poutres d'un plancher</i>	5
<i>Figure I.8: Retrait du béton</i>	6
<i>Figure I.9 : tassement différentiel</i>	7
<i>Figure I.10 : Eclatement de l'enrobage de la poutre et du plancher</i>	7
<i>Figure I.11 : Différents types de réparation par précontrainte additionnelle</i>	10
<i>Figure I.12 : Réparation de poutre par béton projeté</i>	11
<i>Figure I.13 : Réparation de poutre par adjonction d'armature</i>	12
<i>Figure I.14 : Application de plats métalliques selon le procédé l'Hermite</i>	12
<i>Figure I.15: Procède Par Collage De Plaques</i>	14
<i>Figure I.16 : Mise en œuvre d'une réparation par stratification</i>	15
<i>Figure I.17: Différentes méthodes de renforcement par le collage de plaques</i>	16
<i>Figure I.18: le renforcement de structures au moyen de composites préfabriqués</i>	16
<i>Figure I.1 : Une coupe transversale dans une tige de bambou</i>	19
<i>Figure II.2: Matériaux composites</i>	20
<i>Figure II.3 : Les différentes familles de Matrice</i>	20
<i>Figure II.4: Principaux matériaux de renforts</i>	24
<i>Figure II.5 : Observation micrographique de fibres</i>	24
<i>Figure III.1 : Comparaison de comportement entre les poutres renforcées et celle non renforcées</i>	30
<i>Figure III.2 : comportement structural d'une poutre renforcée</i>	31

<i>Figure III. 3 : Différents types de décollements observés sur une poutre renforcée</i>	33
<i>Figure III.4 : définition des paramètres</i>	35
<i>Figure III. 5 : influence de taux de renforcement des armatures tendues</i>	36
<i>Figure IV.1 : Poutre console renforcée par des plaques en matériaux composites</i>	47
<i>Figure IV.2 : Un segment différentiel de la poutre en béton renforcée par composite</i>	47
<i>Figure IV.3. : La comparaison entre la présente méthode et le modèle</i>	54
<i>Figure IV.4. : Effet de la longueur non renforcée sur les contraintes d'interface d'une poutre console en béton armé renforcée par composite</i>	55
<i>Figure IV.5. Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive sur les contraintes d'interface</i> .56	
<i>Figure IV.6: Effet de la rigidité de la colle d'une poutre sur les contraintes d'interface</i> ..	57
<i>Figure IV.7: Effet de la hauteur de la poutre sur les contraintes d'interface</i>	58
<i>Figure IV.8. Effet de la rigidité de la poutre EI sur les contraintes d'interface</i>	59

Liste des notations

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

$[A'] = [A^{-1}]$ Inverse de la matrice de membrane $[A]$.

$[A'_{11}]$ Premier terme de la matrice $[A']$.

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.

$[D'] = [D^{-1}]$ Inverse de la matrice de flexion $[D]$.

$[D'_{11}]$ Premier terme de la matrice $[D']$.

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.

$M(x)$: 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 supérieure 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

Le béton est un matériau relativement fragile et susceptible de se dégrader sous l'influence de nombreux facteurs dont on trouve des pathologies chimique, mécanique et physique. Le renforcement des structures par les matériaux composites est l'une des techniques les plus répandue à travers le monde dans cette dernière décennie. Cette technique consiste à coller une plaque composite sur l'intrados d'une poutre afin d'augmenter sa résistance vis-à-vis de la flexion et / ou de l'effort tranchant. Cependant, le mode de rupture le plus fréquent dans de telle configuration est le décollement de la plaque de renfort du à une forte concentration des contraintes à l'extrémité de cette dernière. Une prédiction de telles contraintes s'avère donc plus que nécessaire afin de se prémunir d'un éventuel risque qui pourrait remettre toute la stabilité de la structure en question. 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 les déformation de cisaillement dans les deux adhérents, Les résultats de notre présent modèle ont été validés par comparaison aux résultats des contraintes d'interface issus de la littérature. Une étude paramétrique a été réalisée afin de mettre en évidence l'impact de différents paramètres sur les contraintes d'interfaces.

Mots clés : Renforcement, Matériaux composite, plaque composite, Contraintes d'interface,

Abstract

Concrete is a relatively fragile material and susceptible to degradation under the influence of many factors of which we find pathologies chemical, mechanical and physical, Building structures by composite materials is one of the most common worldwide in the last decade techniques. This technique involves bonding a composite plate on the underside of a beam in order to increase its resistance to bending and / or shear.

However, the most frequent breaking mode in such configuration is the delamination of the reinforcing plate to a high concentration of stresses at the edges. So a prediction of such constraints is more than necessary in order to guard against a possible risk that could put the entire stability of the structure in question. In this work, we present an analytical method based on the deformation compatibility principle for the calculation of stresses in composite interface - Concrete considering the shear deformation in the two adherent.

The results of our present model were validated by comparison with the results of interfacial stresses resulting from the literature. A parametric study was conducted to highlight the impact of various parameters on the interfaces stresses.

Keywords: Strengthening, composite materials, composite plate, Interfacial stresses.

ملخص

الخرسانة هي مادة هشة نسبياً، وعرضة للتدهور تحت تأثير العديد من العوامل التي يمكن ان نجدها امراض كيميائية، ميكانيكية وفيزيائية. تقوية المباني بواسطة المواد المركبة هي واحدة من التقنيات الاكثر شيوعا في جميع انحاء العالم وخاصة في العقد الاخير. هذه التقنية تنص على الصاق اللوحة المركبة على الجانب السفلي لرافدة من اجل زيادة مقاومتها ازاء الانتشاء و/او قوى القص.

ومع ذلك فان طريقة الانقطاع الأكثر شيوعا في مثل هذه الهيئة وهو نزوح اللوحة المركبة للدعم نتيجة التركيز العالي من الاجهادات على حواف هذه الأخيرة، لذلك التنبؤ لهذه الضغوط هو الأكثر من ضروري لأجل حمايتها من أي خطر محتمل من شأنه أن يعرض استقرار الهيكل بكامله في هذا العمل فإننا نقدم أسلوب تحليلي استنادا إلى مبدأ توافق التشوهات التي تسمح بحساب الاجهادات على سطح اللوحة المركبة الخرسانة اخذين بعين الاعتبار اجهادات القص في كلى- المركبين.

تم التحقق من صحة نتائج نموذجنا الحالي من خلال مقارنتها مع نتائج اجهادات الواجهة المحصل عليها من قبل..

كلمات مفتاحية: تعزيز، مواد مركبة، لوحة المواد المركبة، اجهاد واجهة.

Introduction générale

Depuis longtemps le béton a été considéré comme un matériau principale dans les constructions des ouvrages en génie civil, mais ce matériau possède un défaut est celui de la durée de vie, cette dernière l'exploitation d'un ouvrages en béton armée à une période de cent ans. Ce défaut à plusieurs facteurs dont on trouve des pathologies chimique, mécanique et physique.

La maintenance des ouvrages de génie civil consiste à les protéger en assurant une meilleure étanchéité ou en limitant la corrosion, à les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance dues à la fissuration, à les renforcer en améliorant les performances et la durabilité des ouvrages. C'est un problème de plus en plus préoccupant dans la mesure où le coût des ouvrages neufs est de plus en plus élevé et les conditions de réparation de plus en plus difficiles. Depuis plusieurs années, différentes techniques de réhabilitation (réparation ou renforcement) ont déjà été mises au point : le béton projeté, la précontrainte additionnelle ou encore le collage des tôles d'acier (procédé de L'Hermitte).

La réparation ou le renforcement par collage de matériaux composites, apparue au milieu des années quatre-vingt, s'avère être une technique prometteuse. De nos jours, le collage de matériaux composites est l'une des méthodes de renforcement les plus utilisées dans ce marché en pleine expansion. La réparation ou le renforcement par collage de matériaux composites, apparue au milieu des années quatre-vingt, s'avère être une technique prometteuse. De nos jours, le collage de matériaux composites est l'une des méthodes de renforcement les plus utilisées dans ce marché en pleine expansion.

Le collage de matériaux composites constitue une solution rapide et durable à un besoin croissant de réparation de structures vieillissantes ou endommagées. Cependant, bien que le collage offre plusieurs avantages, grâce à une répartition uniforme des contraintes sur la surface de contact et à l'utilisation d'adhésifs polymères qui ne sont pas sujets à la corrosion, la jonction béton - composite, assurée par une couche d'adhésif pose problème et ce vu la concentration des contraintes qui tendent à séparer les deux parties et provoquent la rupture du renforcement. Dans de tels ouvrages, le décollement de la plaque de composite est un mode de rupture prédominant.

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

L'objectif de notre travail est :

- Développement d'une nouvelle approche analytique pour la détermination des contraintes au niveau de la couche d'adhésif.
- Localisation de l'amplitude maximale de ces contraintes provoquant la rupture par décollement de la plaque en matériaux composites.
- L'étude de l'influence de certains paramètres sur ces contraintes.

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

Dans le premier chapitre nous avons dressé un panorama de l'essentiel des pathologies affectant les ouvrages en béton en les classant en fonction de leur origine chimique, physique ou mécaniques ainsi que les différentes technologies de réparation et de renforcement couramment utilisées dont la technique de renforcement par matériaux composites.

Le deuxième chapitre nous avons commencés par une définition après l'historique puis les différents composants (les matrices et les fibres) des matériaux composites.

Au troisième chapitre une recherche bibliographique sur le comportement des poutres renforcées en plaques de matériaux composites et les différentes solutions proposées dans la littérature pour déterminer les contraintes d'interface.

Quant au chapitre quatre. est consacré au développement mathématique du nouveau modèle pour le calcul des contraintes d'interface. La validation du modèle a été effectuée par comparaison avec ceux, des plus récents, issus de la littérature. Une étude paramétrique a été présentée dans ce chapitre.

Enfin nous achevons notre travail par une conclusion générale construite avec les résultats obtenus avec notre méthode et permet de souligner son efficacité dans la conception et le calcul relatif au renforcement des structures par matériaux composites, et nous dégagerons quelques perspectives au travail présenté ici.

CHAPITRE I

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

I.1. Introduction

Le béton armé est un matériau de base des structures largement utilisé depuis plus d'un siècle, aussi bien dans le génie civil que dans le bâtiment. Sa conception de durabilité repose sur plusieurs facteurs tel que la composition des matériaux, les conditions d'exploitation, les dimensions structurelles, la mise en œuvre et le manque d'entretien ainsi de suite.

Cette diversité des facteurs permette la manifestation des pathologies apparentes ou cachées, ces dernières se développent progressivement avec le temps en aggravant la situation plus en plus jusqu'à la ruine totale de l'ouvrage.

Le choix de la méthode de réparation ou de renforcement 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. En effet cette étape est nécessaire pour le choix de la réparation ou renforcement la plus durable un panorama de l'essentiel des pathologies affectant les ouvrages en béton en les classant en fonction de leur origine chimique, physique ou mécanique ainsi que les différentes techniques de réparation ou renforcement couramment utilisées.

I.2. Pathologies des ouvrages en béton armé

I.2.1. Pathologie d'origine chimique

• Carbonatation

La carbonatation des composés hydratés du ciment par dioxyde de carbone de l'aire (CO_2) diminue le pH de la solution interstitielle d'une valeur de l'ordre du pH 12,6 à une valeur inférieure à pH 9 de telle sorte que la pellicule d'oxyde passif protégeant l'acier n'est plus stable. En effet, les résistances mécaniques et les modules d'élasticité augmentent, tandis que la perméabilité et la porosité diminuent grâce à la formation des carbonates de calcium (CaCO_3) [RABEHI . 2005].

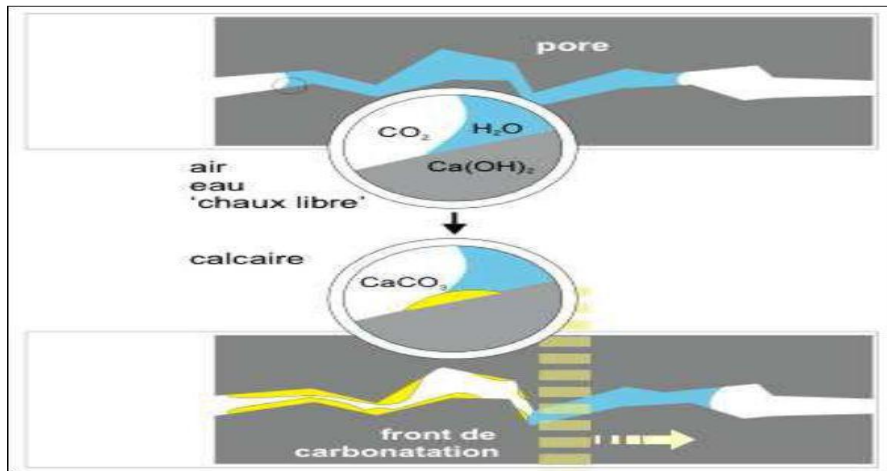


Figure I.1: Processus de carbonatation [Andrade (C.), et al 2001]

- **Attaque des chlorures**

Les ions chlorures peuvent provenir des constituants du béton : ciment, sable, eau de gâchage. Cependant, l'origine des chlorures est le plus souvent extérieure : l'eau de mer, des sels de déverglaçage. Dans ce cas-là, les ions chlorures pénètrent dans le béton par diffusion ou par absorption capillaire. De très faibles concentration en chlorures forment le composé $FeOOH$ sur la couche passive, puis les ions instables de $FeCl_3$ consomment les ions hydroxyles présent ce qui conduit à une diminution de PH [NET 01]



Figure I.2 : Poutre située en bord de mer sous de l'agression des chlorures [NET 01].

• **Attaques Acides**

Le béton présente un caractère basique élevé induit par les composés hydratés de la pâte de ciment (la phase interstitielle contenue dans le béton a un pH très élevé).

Il peut donc présenter une certaine réactivité vis-à-vis des solutions acides telles que les pluies acides, les eaux naturelles chargées en dioxyde de carbone, les eaux résiduaires, les eaux des industries agroalimentaires ou industrielles contenant des acides organiques, les eaux chargées en acides minéraux, mais aussi les eaux pures [ITMAIZEH . 2016].

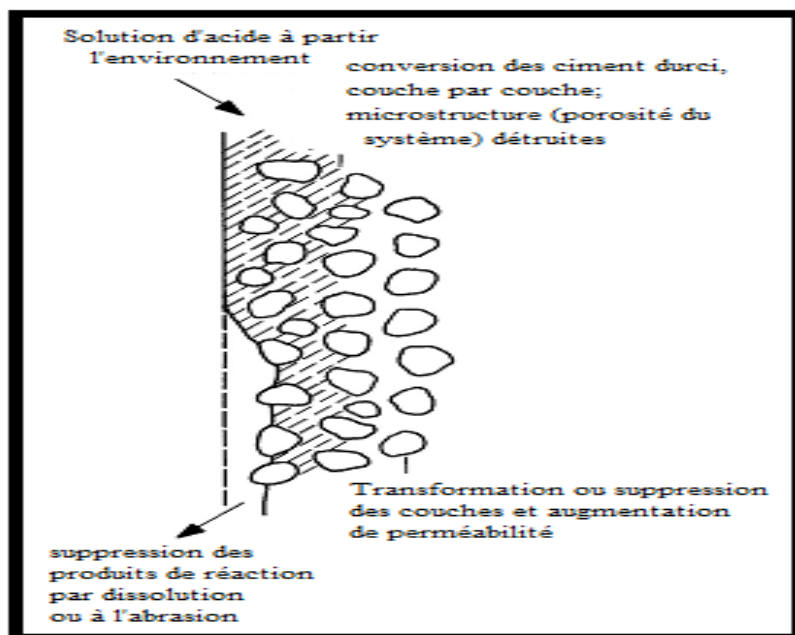


Figure I. 3: Mécanisme des attaques par les acides [Thomas Telford. 1997]

• **Alcali-réaction**

Est une réaction endogène «génères à l'intérieur » qui affecte le béton dans sa masse contrairement aux autres réactions, l'alcali-réaction peut être considéré comme une réaction solide/liquide entre des formes de silice réactive des granulats et la solution alcaline de la matrice cimentaire distribuée dans la microporosité [Jean-Pierre OLLIVER et Angélique VICHOT. 2008].



Figure I.4 : Fissurations de la poutre de pont provoquées par l'alcali-réaction [NET 02].

- **La corrosion des armatures**

En plus de son vieillissement à l'intérieur du béton sous l'action d'agents agressifs tels que l'eau ou de réactifs chimiques, l'acier se corrompt. Autrement dit, il se transforme en oxydes, sulfures, carbonates, etc., ou en une autre forme plus stable par rapport au milieu environnant. Cela entraîne systématiquement aux changements et chutes de la performance mécanique et toutes les caractéristiques se dégradent [TANKEU NDANGA Tatiana, 2011].



Figure I.5 : Corrosion des armatures métalliques [paddy engineering.2015]

1.2.2. Pathologie d'origine physique

- **Erosion, abrasion et choc**

Les ouvrages les plus touchés par l'érosion se situent essentielle en milieu fluvial et maritime. Ils sont soumis au charriage d'éléments solides induits par les courants et 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 [Yahyaoui, 2006].



Figure I.6: Dégradation par choc [Hamlaoui Salim. 2012].

- **Séisme**

Un séisme est une manifestation de la tectonique des plaques. Il se traduit en surface par une vibration du sol provenant d'un déplacement brutal de la roche. En surface, un séisme peut dégrader ou détruire des bâtiments, produire des décalages de la surface du sol de part et d'autre des failles [Ould El Hacem, 2016].



Figure I.7 : Fissurations excessives de deux poutres d'un plancher [Séisme de Boumerdes, 2003].

- **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 de son plus jeune âge et, par conséquent, à créer des fissures. [Yahiaoui, 2006].



Figure I.8: Retrait du béton [Gherdaoui Moufida .2018].

1.2.3. Pathologie d'origine mécanique

- **Tassement différentiel**

Lorsqu'un sol tasse d'une façon inégale sous les différents points d'une fondation, on dit qu'il y-a un tassement différentiel.

Il se manifeste soit par un basculement soit par de graves désordres dans les éléments non structuraux et parfois dans la structure elle-même si le tassement est important.

Les causes des tassements différentiels sont multiples, mais les plus fréquemment rencontrés sont :

- Les sols compressibles,
- Les remblais récents,
- La non homogénéité du sous-sol de fondations,
- L'emploi des fondations hétérogènes,
- Les affouillements du sol sous les fondations,
- La modification du volume de certains sols en fonction de la teneur en eau,
- La non homogénéité de la super structure [Kaouadji . 2013].



Figure I.9 : tassement différentiel [Ould El Hacem . 2016].

- **Incendie**

Les dégradations de béton par incendie provoquent un endommagement significatif du béton et des armatures. L'incendie ayant pour effet de faire augmenter très vite la température du béton (plus de 700° C au bout de 4 heures à une dizaine de centimètres du parement), cela se traduit, d'une part, par des contraintes différentielles importantes entre parement et cœur du béton et, d'autre part, par une transformation irréversible des constituants du béton.

La température atteinte par un point située dans le talon d'une poutre à 5 cm du parement est d'environ 150° C après 30 min, 600° C après 2 heures et 850° C au bout de 4 heures. A une température de 573° C les granulats contenant du quartz se fissure, à 800° C les granulats calcaires de décarbonatent avec libération de CaCO₃ [CAL.1997].



Figure I.10 : Eclatement de l'enrobage de la poutre et du plancher [Maalem , 1998]

- **Ondes de chocs**

Le béton est susceptible de s'épauprer quand il est soumis à des ondes de choc. Ceci est dû aux différentes vitesses de propagation des ondes dans les différents matériaux (les agrégats, le liant et les armatures) [Ould El Hacem, 2016].

1.2.4. Agressivité du milieu extérieur

- **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.

- **Sels de dévers-glaçage**

Les sels de dévers-glaçage employés pour faire fondre la glace induisent une réaction endothermique, c.-à-d. une réaction au cours de laquelle le milieu environnant cède une partie de sa chaleur. En l'occurrence, la chaleur est prélevée dans la couche superficielle du béton qui, en raison de la chute brutale de température, subit un choc thermique et s'expose ainsi à un risque d'écaillage. Par ailleurs, les ions chlore des sels de dévers-glaçage peuvent engendrer un risque de corrosion pour les armatures [ITMAIZEH . 2016].

- **Action des eaux de mer**

Le béton exposé à l'environnement marin peut se détériorer en raison des effets combinés de l'action chimique des constituants d'eau de mer sur les produits d'hydratation du ciment, alcali-granulat d'expansion (lorsque des granulats réactifs sont présents), la pression cristallisation des sels dans le béton, si une face de la structure est soumise à de mouillage et d'autres à des conditions de séchage, action du gel dans les climats froids, la corrosion de l'acier encastré dans les membres armés ou précontraints, et l'érosion physique due à l'action des vagues et des objets flottants. L'attaque sur le béton en raison de l'une de ces causes tend à augmenter la perméabilité, non seulement rendre le matériel de plus en plus sensible à d'autres mesures par le même agent destructeur, mais aussi par d'autres types d'attaques [P.Kumar Mehta Paulo J.M.Monteiro . 2006].

I.3. Les différentes techniques de réhabilitation

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.1997]. 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 [Chedad.A . 2016].

1.3.1.Méthodes de réparation non structurales

L'existence de fissures au niveau d'un élément structural peut entraîner des désordres grave s'ils ont sous-estimé, qui peut atteindre une perte de portance ou bien un dysfonctionnement qui influe sur l'ensemble de la structure, la distribution 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 [Chedad.A . 2016].

1.3.2. Méthodes de réparation structurale

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

1.3.2.1. Réparation par précontrainte additionnelle

Contrairement aux techniques présentées ci-dessus qui consistent en l'ajout de matière (béton ou acier), la précontrainte additionnelle consiste en un ajout de force dans des ouvrages existants en vue soit de leur redonner leur état de service initial, soit de leur donner un nouvel état de service. Elle permet, en effet, d'appliquer des efforts d'une intensité connue, en des points et suivant des directions bien définies, capables de s'opposer aux efforts générateurs des désordres. Elle est réalisée le plus souvent par la mise en œuvre d'armatures de précontrainte (câbles ou barres). La précontrainte additionnelle peut être employée pour traiter une grande variété d'ouvrage (ponts, barrages, réservoirs, bâtiments). Cette méthode est particulièrement adaptée au renforcement en flexion et vis-à-vis de l'effort tranchant par l'emploi d'étriers actifs [Ould El Hacem . 2016].

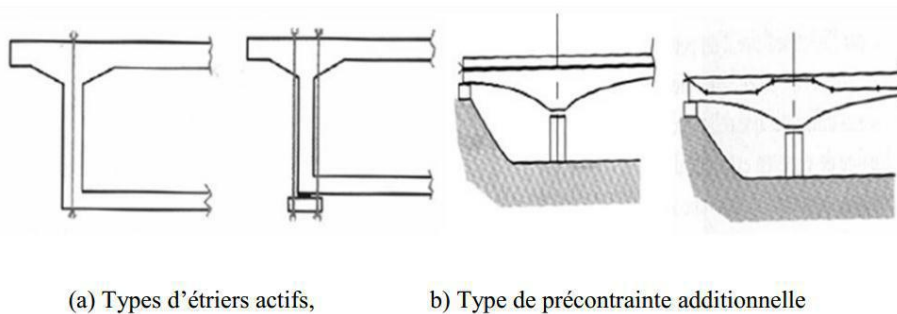


Figure 1.11 : Différents types de réparation par précontrainte additionnelle [Ait Ameur Meziane.M.2008].

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.

1.3.2.2.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, exige pour sa mise en œuvre un personnel spécialisé. Le béton peut être, ou non, combiné avec l'adjonction d'armatures complémentaires. Après durcissement, le béton projeté possède les propriétés d'un béton coulé, puis vibré [Resse c. et Venuat M. 1981]. La projection est possible dans toutes les directions, en particulier en plafond figure(I.12).

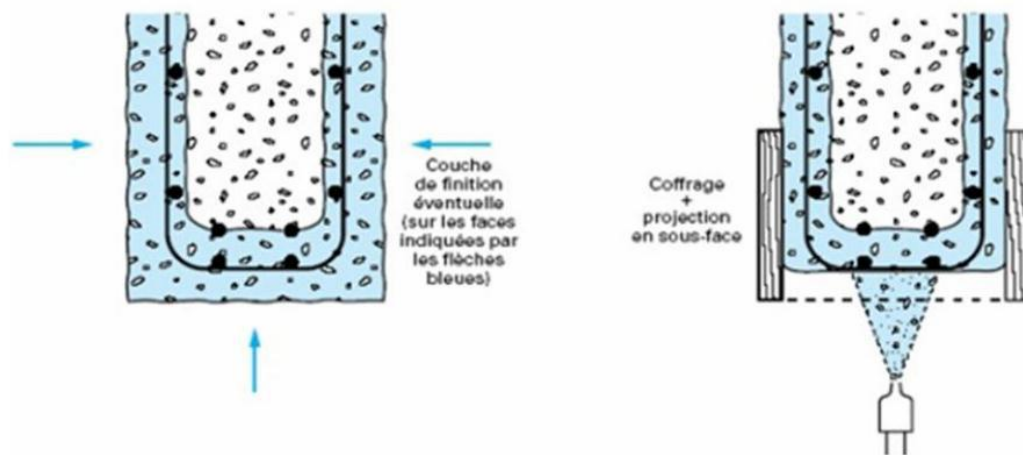


Figure I.12 : Réparation de poutre par béton projeté [Resse c. et Venuat M. 1981].

1.3.2.3.Réparation par adjonction d'armature complémentaire

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'il s'agit de remplacer des aciers corrodés ou coupés accidentellement ou lorsqu'il s'agit de renforcer une structure. Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration, et participer à la résistance des sections renforcées. La protection de ces armatures est assurée par un béton coulé ou projeté et leurs jonctions avec les armatures existantes peuvent se faire par des procédés classiques (recouvrement, soudure, manchonnage) [Aït Aneur Meziane.M.2008].

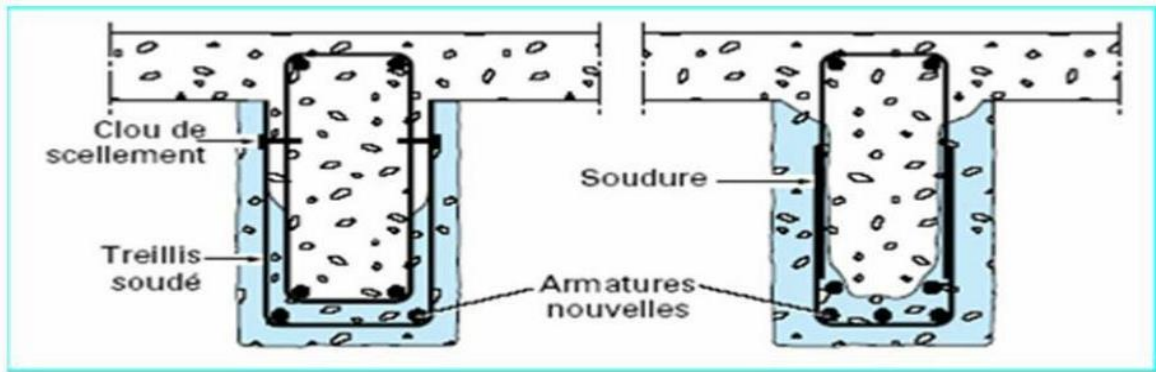


Figure I.13 : Réparation de poutre par adjonction d'armature [Ait Ameer Meziane.M.2008]

I.3.2.4. Renforcement par collage de plats métalliques

Le renforcement de structure par plats métalliques, mieux connues sous le nom de procédé l'Hermite, consiste à coller des plats en acier sur les faces tendues de structures en béton armé.

Ce procédé consiste en un apport d'armature extérieure soit pour consolider un élément dont les dégradations mettent en péril la résistance, soit pour remplacer des aciers oubliés (Sharif, 1994) ou mal positionnées. Ainsi, l'Hermite (l'Hermite, 1967) s'est intéressé, dès le début des années soixante, à l'utilisation des composé adhésifs de type époxy polymérisant à froid pour associer béton et acier (Luyckx, 1999).

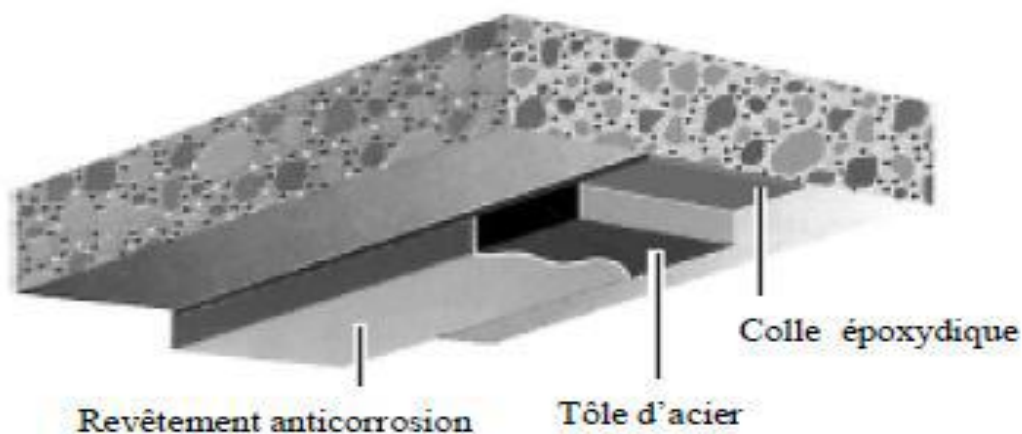


Figure I.14 : Application de plats métalliques selon le procédé l'Hermite [GHERDAOUI Moufida . 2018]

En effet, cette technique a été particulièrement étudiée par l'Hermite et Bresson (Bresson J. 1971) afin d'assurer la réparation et le renforcement de structure en béton armé présentant des insuffisances à la flexion et s'est développée suite à l'apparition sur le marché de colles, en particulier des résines époxy possèdent des caractéristiques d'adhésion élevées, susceptibles de transmettre des efforts non négligeables. 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 réparation des efforts entre tôles dans le cas d'un empilement.
- La réparation 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 4 mm. La colle utilisée est, généralement, une résine époxyde, son épaisseur est de 0.5 à 1 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 réparation ou le renforcement par les tôles collées est aujourd'hui une technique maîtrisée et parfaitement au point cependant elle présente aussi quelque difficulté :

- 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 **[Luyckx J. 1999]**.

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 (masse manipulées trop importantes), ce qui limite d'autant les possibilités de réparation.

1.3.2.5. Renforcement par collage des plats composites

Les plaques composites sont des produits finis présentent sous forme de bandes ou de joncs, plus ou moins rigides suivant les épaisseurs et les diamètres. La section des bandes les plus courantes est 100 x 1 mm, leur longueur, suivant la demande, varie de quelques centimètres à plusieurs centaines de mètres.

Cette technique, comme celle du plat collé métallique, permet difficilement de maîtriser les épaisseurs de colle, en raison de la rigidité des aciers et des composites. L'application de ces renforcements sur des surfaces ayant des défauts de planéité ou sur des surfaces courbes ou non développables reste très limitée. [SIDNEY M, JOHNSON. 1969].



Figure 1.15: Procède Par Collage De Plaques [SIKA, 1996].

1.4. 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.





Figure I.16 : 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 I.17 présente différentes configurations de collage de matériaux composites sur une poutre, chaque configuration est prévue pour un objectif particulier et la figure I.18 montre le renforcement de structures au moyen de composites préfabriqués Sika® CarboDur®

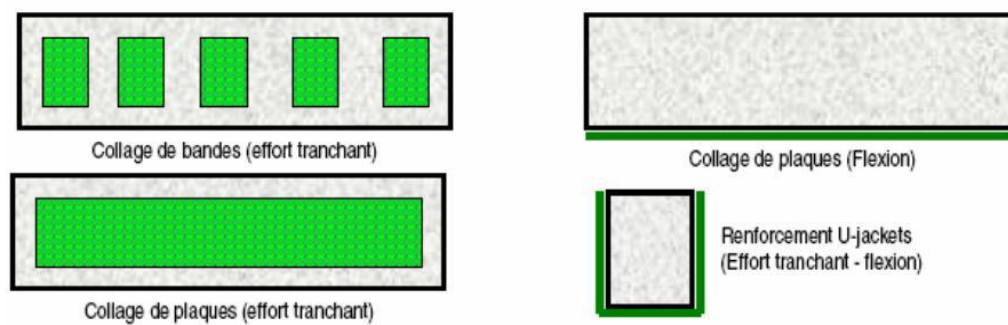


Figure I.17: Différentes méthodes de renforcement par le collage de plaques [Perrier R et Hamelin P. 1996].

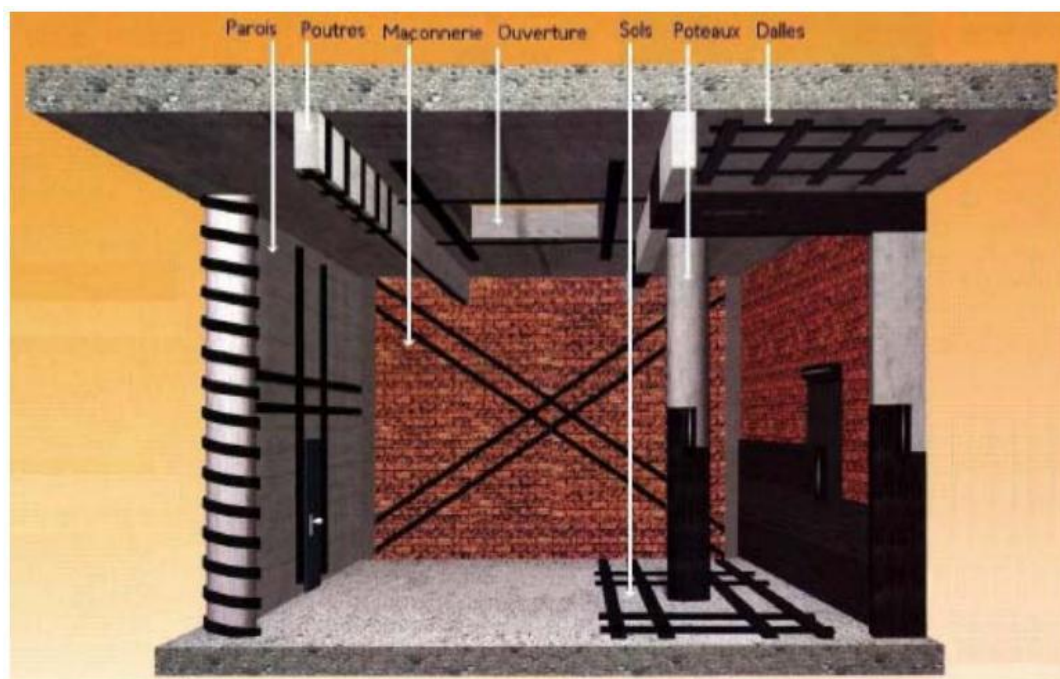


Figure I.18: le renforcement de structures au moyen de composites préfabriqués [Perrier R et Hamelin P. 1996].

1.5. Conclusion

Donc, il est possible de conclure que les constructions en béton armé souffrent de plusieurs phénomènes des dégradations plus ou moins prononcés. Qui sont liés d'une part aux techniques et les conditions de mise en œuvre, et non-respect des propriétés du béton sur chantier (enrobage insuffisant, mauvais choix des constituants...). Et d'autre part, aux conditions de milieu extérieur.

Dans ce chapitre, nous avons défini les différentes pathologies du béton, Tous ces phénomènes affaiblissent les ouvrages et leur font perdre les caractéristiques mécaniques qui avaient été calculées lors de leur conception, il est important de développer des technique de renforcement pour augmenter sa durée de vie. Les opérations de maintenance des ouvrages consistent à :

- Les protéger en limitant la corrosion et en assurant de meilleures conditions d'étanchéité.
- Les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance.
- Les renforcer en améliorant les performances et la durabilité de l'ouvrage.

Le renforcement par matériaux composites sont devenus de plus en plus reconnus, il a attiré l'attention des chercheurs et les développeurs car ils présentent des avantages indéniables (caractéristiques mécaniques élevées, faible poids, très bonnes performances vis-à-vis de la corrosion, durabilité vis-à-vis des agressions chimiques, leurs aptitudes au formage et au moulage) qui justifient pleinement leur utilisation pour le renforcement et/ou réparation des ouvrages de génie civil.

Chapitre II

*Généralité sur les
matériaux composites*

II.1. Introduction

L'intégration des matériaux composites dans le domaine du génie civil s'est avéré une source de plusieurs nouvelles applications. Les recherches récentes sur les composites ont amené les ingénieurs à s'intéresser à l'utilisation de ces nouveaux matériaux dans le domaine de la construction.

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions. Dans chacun des marchés d'application (automobile, bâtiment, électricité, équipements industriels...), ces performances remarquables sont à l'origine de solutions technologiques innovantes.

L'utilisation des matériaux composites pour la réhabilitation et le renforcement devient une solution préconisant un remplacement tout aussi efficace que l'acier. Compte tenu de ses avantages, Les matériaux composites représentent un très bon investissement en ce qui a trait au renforcement et à la réhabilitation des structures en béton armé. Les seuls inconvénients sont le coût du matériau et le manque de connaissances autant sur son comportement à long terme sur les structures que sur les techniques de conception.

II.2. Définition des composites

Les matériaux composites sont des matériaux solides constitués de l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles et de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'association confère à l'ensemble des propriétés qu'aucun des composants pris séparément ne possèdent. Le renfort généralement de nature fibreuse permet de supporter la charge de la structure, réduit les contraintes thermiques et assure la rigidité et la résistance macroscopique. La matrice permet de lier le renfort, assurer une protection face aux agents extérieurs et transférer les charges au renfort via la liaison entre la fibre et la matrice [Rokbi. M.2001].

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice :

- Les composites à matrices organiques (CMO) qui constituent, de loin, les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle.
- Les composites à matrices céramiques (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme dans les domaines spatial, nucléaire et militaire, ainsi que le freinage.
- Les composites à matrices métalliques (CMM) intéressent les concepteurs des industries automobiles, électroniques et de loisirs pour répondre à des exigences mécaniques spécifiques.

Tableau II. 1: les différents types de composites [Badour S. 2018].

Type de composite	Constituants	Domaine d'application
Composites matrice organique - papier - carton - panneaux de fibres toiles enduites - matériaux d'étanchéité et pneumatiques	- Résine/fibre cellulosique - Résine /copeaux - Résine / tissus - Elastomère - Caoutchouc/ acier	-Imprimerie -bâtiment -toitures -Automobile
composites à matrice minérale - bidon - Composite - carbone	- Ciment/sable /granulats - Carbone / fibres	- Génie civil - aviation - espace
Composites à matrice métallique	- Aluminium /fibres de bore - Aluminium /fibres de carbone	- aérospatial

• **Avantages et inconvénients des 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.

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.

L'industrie des matériaux composites doit donc aujourd'hui relever certains défis tels que :

- la maîtrise des émanations de produits organiques volatiles, par exemple le styrène;
- La maîtrise des procédés de transformations et des performances des matériaux qui sous-entend une très bonne connaissance des constituants mis en place;
- La mise en place de technologies et des filières pour la gestion des déchets en fin de vie qui est la partie la plus difficile à satisfaire en raison du caractère thermostable de la plupart des composites.

De plus, dans ce dernier point, le recyclage est actuellement très limité parce que le broyage ou les autres procédés sont très coûteux et fournissent une matière de faible qualité.

Ces quelques inconvénients et défis à relever, ont poussé les chercheurs et les pouvoirs publics à investir et orienter les recherches vers les ressources renouvelables et biodégradables [B. Agoudjil. 2008].

II.3. Historique

Le bois fut le premier matériau composite naturel utilisé, ensuite le torchis a été utilisé en construction pour ses propriétés d'isolation et de coût. Parmi les premiers composites fabriqués par l'homme on trouve aussi les arcs Mongols (2000 ans av. J. -C.). Leur âme en bois était contrecollée de tendon au dos et de corne sur sa face interne. Les sabres japonais respectant les traditions sont aussi un exemple de matériaux composites particulièrement ancien. Les forgerons nippons procédaient au pliage et au martèlement du métal jusqu'à obtenir une sorte de pâte feuilletée pouvant être composée de plus de 4 000 couches. Le procédé de pliage était utilisé pour maîtriser exactement l'uniformité de l'acier mais aussi sa composition en carbone tout en conférant à la lame ses propriétés de résistance et de souplesse.

- 1823 : Charles Macintosh crée l'imperméable avec du caoutchouc sur des tissus comme le coton.
- 1892 : François Hennebique dépose le brevet du béton armé (le composite utilisé en construction) avec le béton qui forme la matrice et l'acier qui forme le renfort.

- 1940 : Utilisation de composés de fibres de lin et de résines phénoliques dans la construction aéronautique en Angleterre.
- 1945: Utilisation de résine époxy et fibres de verre aux États-Unis et en Allemagne.
- 1956 : Le pavillon de toit de la Citroën DS est réalisé en matériaux composites
- 1967 : Fabrication des pales de l'hélicoptère Alouette en matériau composite.
- 1970 : Rolls-Royce conçoit les pales de turbine du réacteur RB211-22 en composite fibre de carbone.
- 1970 : Rossignol développe des skis composite fibre de verre-résine.
- 2009: Fabrication du Boeing 787 qui intègre 50% de matériaux composites [NET 03].

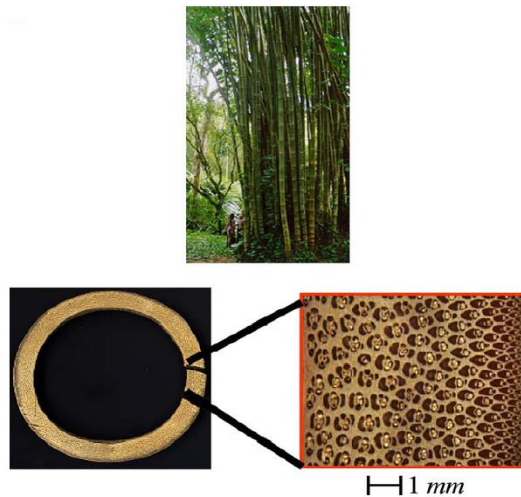


Figure I.1 : Une coupe transversale dans une tige de bambou [Messoussa M. 2019].

II.4. Les différents composants de matériaux composites

Les matériaux composites sont constitués principalement :

D'une matrice à laquelle sont ajoutés, dans certains composites des charges,

D'un renfort.

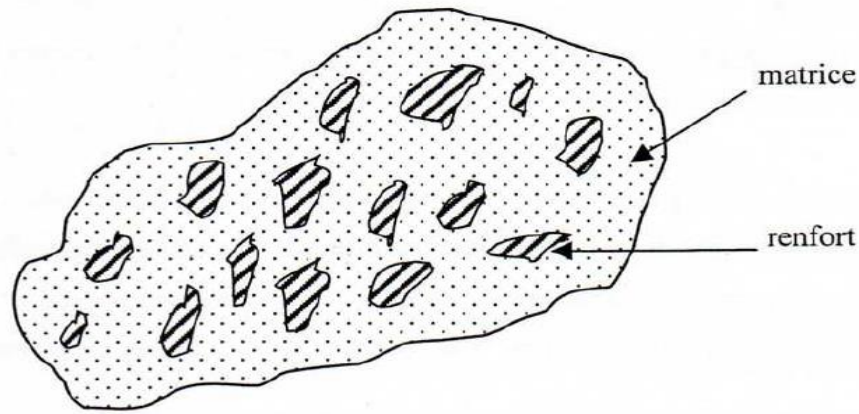


Figure II.2: Matériaux composites [D. M. Bigg. 1995].

II.4.1. La matrice

La matrice constitue l'élément de liaison entre les divers éléments constitutifs et donne la forme voulue au produit réalisé. Elle assure également une protection chimique.

Les matrices doivent présenter une bonne compatibilité avec le renfort. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à permettre aux matériaux composites de conserver ces caractéristiques mécaniques spécifiques élevées [Daniel Gay .1997, J.M. Berthelot .1999].

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

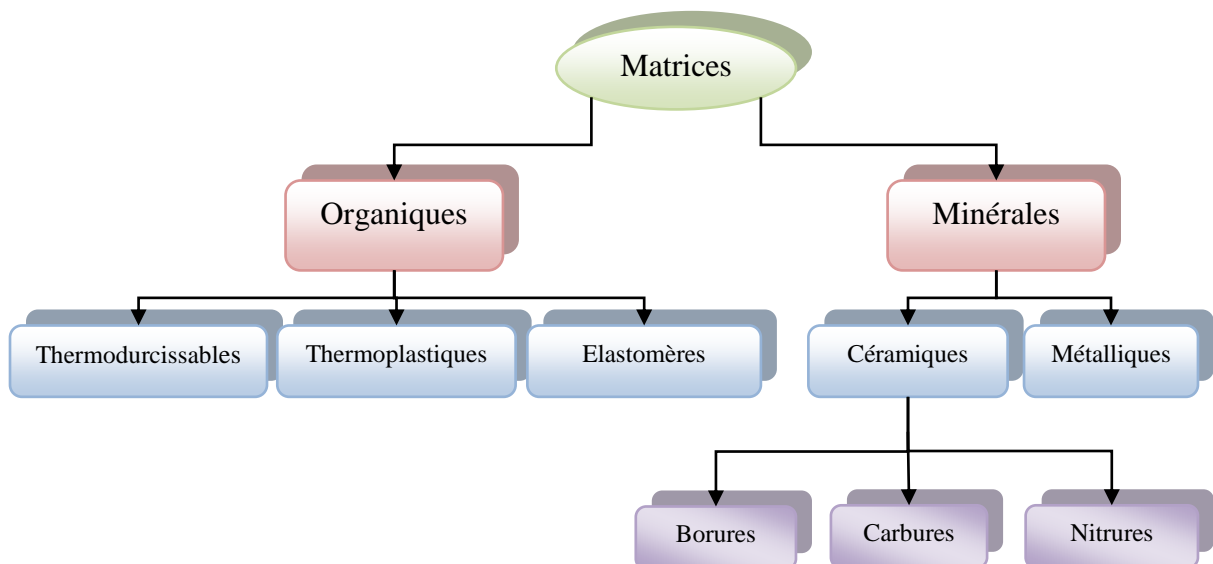


Figure II.3 : Les différentes familles de Matrice [Koizumi, M. 1993].

II.4.1.1. Les résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables sont employées comme matrice des matériaux composites structuraux. Comme leur nom le laisse indiquer, ces produits durcissent après un cycle de chauffage appelé « cycle de polymérisation ». A l'issue de celui-ci, le matériau est un solide relativement rigide qui ne fond pas et ne se ramollit pas en température. De ce fait, ils ne peuvent être mis en forme qu'une seule fois et ceci avant qu'ils ne durcissent, donc avant l'accomplissement du cycle de polymérisation.

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** : 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 et NEGRIER. A. 2013].

Tableau II.2:Caractéristiques des résines thermodurcissables [Laurent Gornet. 2011].

Résine	Tf (°C)	ρ (Kg/m3)	$\epsilon_R(\%)$	$\sigma_R(MPa)$	$\sigma_R(MPa)$	E (GPa)
Polyesters	60 à 100	1140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2,8 à 3,6
Phénoliques	120	1200	2,5	40	250	3 à 5
Epoxydes	290	1100 à 1500	2à 5	60 à 80	250	3 à 5

II.4.1.2. Les résines thermoplastiques

Les thermoplastiques (TP) présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques. Un renforcement de fibres courtes leur confère une tenue mécanique et thermique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle. Toutefois, l'appellation « composite » n'est pas interprétée d'une manière uniforme, et certains industriels n'y incluent pas les thermoplastiques renforcés de fibres courtes qui représentent pourtant 90% des composites à matrice thermoplastique.

Les principales résines thermoplastiques utilisées dans les composites sont :

- les polyamides (PA) 6, 6-6, 12 ;
- les polytéréphtalates éthylénique (PET) et butylénique (PBT) ;
- le polycarbonate (PC) ;
- les polyoxides de phénylène (PPO ou PPE) ;
- les polyoxyméthylène (POM) [Benachour A. 2010].

Tableau II.3. Caractéristiques des résines thermoplastiques [Laurent Gornet. 2011].

Résine	Tf (°C)	$\rho(Kg/m3)$	$\sigma_R(MPa)$	E (GPa)
Polyamide	65à100	1140	60 à 85	1,2 à 2,5
polypropylène	900	1200	20 à 35	1,1 à 1,4

Tableau.II.4: Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques [E. J. JULES. 2001].

Matrices	Thermoplastiques	Thermodurcissables
Etat de base	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage matière de base	illimité	Réduit
Mouillabilité des renforts	difficile	Aisée
Moulage	Chauffage + refroidissement	Chauffage continu
Cycle	long	Court
Tenue au choc	Assez bonne	Limitée
Tenue thermique	réduite	Meilleure
Chute et déchets	recyclables	Perdus

II.4.1.3. Les matrices métalliques

L'utilisation de matériaux composites à des températures supérieures à 3000 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 [Berreur, 2002].

II.4.2. Les renforts

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet de résistance orientée [R. L. Goring and S. W. Churchill.1961]. Les propriétés des composites sont principalement influencées par le choix des fibres [Teng, 2002, Carolin, 2003]. Parmi les fibres les plus connues en génie civil, on peut citer : le carbone (haut module élastique et résistances mécaniques importantes à la fatigue), le verre (résistances moyennes, très utilisé pour renforcer les bétons) et l'aramide (de haute résistance à la traction, utilisée en câbles de hautes performances).

Les différents types de renforts sont cités dans l'organigramme ci-dessous.

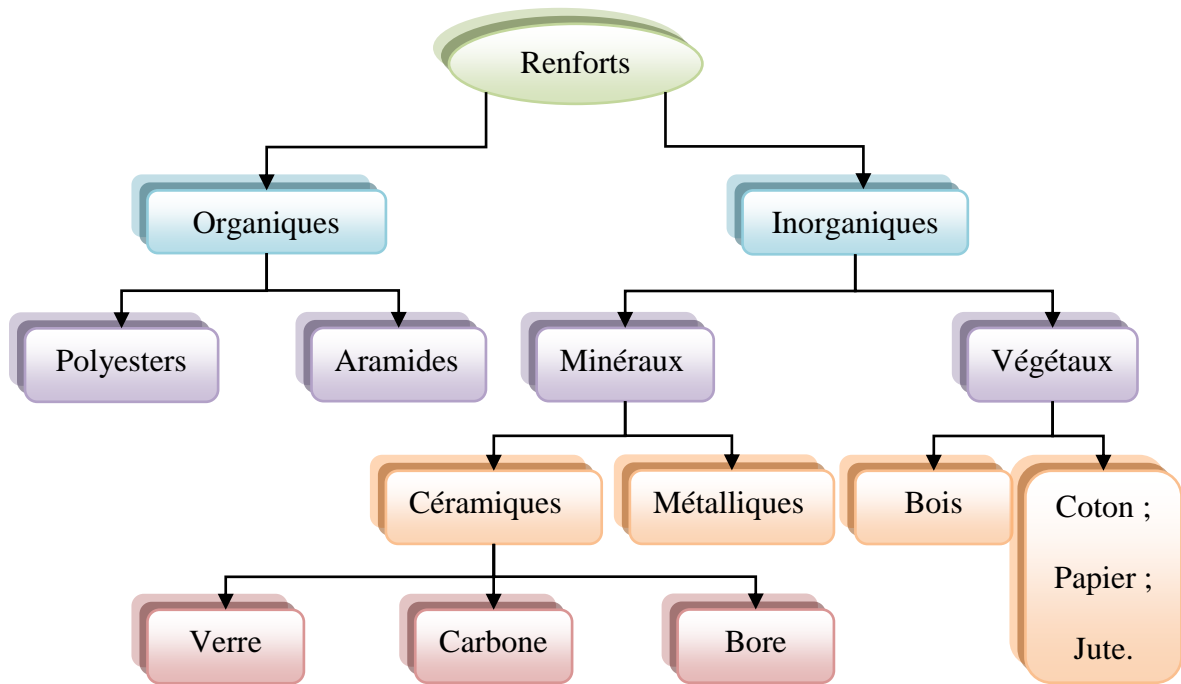


Figure II.4: Principaux matériaux de renforts [Koizumi, M. 1993]

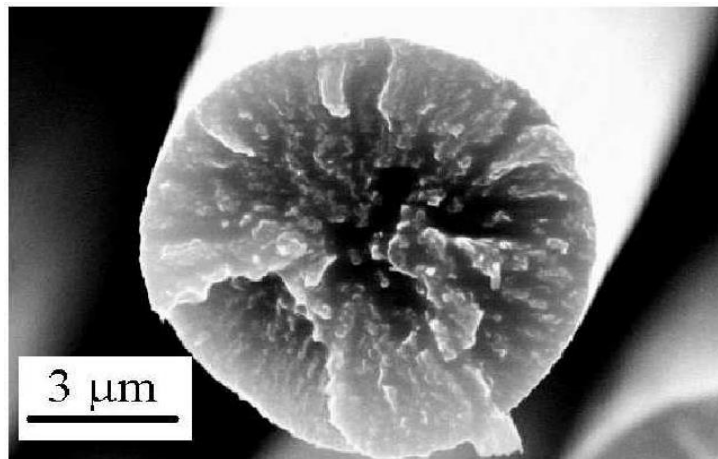


Figure.II.5 : Observation micrographique de fibres [C. LORRETTE. 2007]

Les principales fibres utilisées sont :

- Fibre de Carbone ;
- Fibre de Verre;
- Fibre de d'Aramide ;
- Fibre de céramiques ;

• **Fibre de carbone**

Les fibres de carbone ont un haut module d'élasticité, de 200 à 800 GPa. L'allongement ultime est de 0,3 à 2,5 %. Les fibres de carbone n'absorbent pas l'eau et elles résistent à plusieurs solutions chimiques. Elles présentent une résistance excellente à la fatigue, et une faible relaxation comparée à celle des aciers extensibles précontraints. La fibre de carbone est un conducteur électrique et, par conséquent, peut donner la corrosion galvanique si elle est en contact direct avec l'acier. Il faut signaler également le mauvais comportement au choc et à l'abrasion des stratifiés renforcés par des fibres de carbone. Les fibres de carbone se différencient par le taux de carbone plus ou moins élevé qui modifie les allongements et les contraintes à la rupture et les modules d'élasticité. On trouvera des fibres dites « à haute résistance » HR et des fibres « à haut module » HM ou même « à très haut module » THM, et des fibres intermédiaires [Châtain, M.2001].

Tableau II.5 : Propriétés des fibres de carbone [Mahamat Oumar Andjami .2013].

Propriétés en traction	HR	IM		HM	
R_t (MPa)	3000 à 5000	4000 à 4500	47000 à 52000	2000 à 2500	1100 à 2000
E_{σT} (MPa)	220000 à 240000	235000 à 250000	275000 à 300000	350000 à 400000	450000 à 500000
A_R (%)	1.2 à 1.5	1.6 à 1.8	1.4 à 1.6	0.5 à 0.7	0.3 à 0.5
Masse volumique (g/cm³)	1.7 à 1.8	1.75 à 1.8	1.7 à 1.8	1.8 à 1.85	1.9 à 1.95

R_t, E_{σT} et A_R sont respectivement la résistance à la rupture, le module de Young et l'allongement à la rupture.

• **Fibres de Verre**

Les fibres de verre sont moins chères que les fibres de carbone et les fibres d'aramide. Par conséquent, les composites en fibres de verre sont devenu la solution la plus utilisée dans plusieurs applications, tel que le génie civil, l'industrie des bateaux et d'automobiles. Les modules d'élasticité des fibres sont de 70 à 85 GPa avec un allongement ultime de 2 à 5 % selon la qualité. Par contre les fibres de verre peuvent avoir des problèmes de relaxation. Elles sont aussi sensibles à l'humidité, mais avec le choix correct de matrice les fibres sont

protégées. Il existe une multitude de fibres de verre dont les propriétés dépendent de leur composition.

Actuellement, trois types de fibres de verre sont commercialisés sous forme de files. Ce sont les variétés E, S et R. Ces deux derniers sont très voisines (l'une est Américaine et l'autre est Française) [Badour S. 2018].

Tableau II.6: Propriétés des fibres de Verre [Mahamat Oumar Andjami .2013].

Propriétés en traction	Verre E	Verre R	Verre S
R_t (MPa)	3400	4400	4900
E_{oT} (MPa)	73000	86000	87000
A_R (%)	4.9	5.2	
Masse volumique (g / cm ³)	2.54	2.55	2.54

- **Fibre d'Aramide**

Appelés aussi polyamide aromatique, une marque bien connue des fibres d'aramide est « kevlar » mais il existe d'autres marques aussi tel que « Twaron », « Technora », et « SVM ».

Les modules d'élasticité de ces fibres sont de 70 à 200 GPa avec une haute énergie de fracture et un allongement ultime de 1,5 à 5 % selon la qualité. Les fibres d'aramide sont sensibles aux températures élevées, à l'humidité et aux radiations « ultraviolet » et par conséquent, ne sont pas largement utilisées dans les applications de génie civil. Plus loin, les fibres d'aramide ont des problèmes avec la relaxation et la corrosion, mais avec une bonne résistance au choc et à la fatigue [Berreur, 2002].

Actuellement, il existe deux types de produits : les fibres de Kevlar 49 et les fibres de Kevlar 2.

Tableau II.7 : Propriétés des fibres de Kevlar [Mahamat Oumar Andjami .2013].

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

• **Fibres céramiques**

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions. Quelques exemples de fibres céramiques [Laurent Gornet. 2011].

- Fibres de Carbure de Silicium.
- Fibres de Bore.
- Fibres de Bore carbure de silicium.

Tableau II.8: caractéristique de fibres céramiques [Laurent Gornet. 2011].

Renforts	ρ (Kg/m³)	σ_t^R(MPa)	σ_c^R(MPa)	E (GPa)
AS4	1800		3599	235
T300	1700	1,2	3654	231
IM6		0,88	1460	
IM8	1800		5171	310

II. 5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synoptique sur les matériaux composites. On s'est intéressé à ceux résultant de l'assemblage d'une matrice et d'un renfort se présentant sous forme de fibres. Cette présentation montre les caractères avantageux de ces matériaux à savoir légèreté et une grande résistance à la traction.

En général, le composite est formulé pour satisfaire à des critères de résistance, de rigidité ou bien de tenue à l'action de l'environnement. Les propriétés finales dépendent des propriétés élémentaires de chaque constituant.

Les composites trouvent leurs principales applications dans le transport aérien, maritime et ferroviaire, le bâtiment, l'aérospatial ainsi que les sports et loisirs, notamment grâce à leur bonne tenue mécanique comparable aux matériaux homogènes comme l'acier et à leur faible masse volumique.

Chapitre III

*Comportement des poutres en béton
armé renforcées par matériaux
composites*

III. 1. Introduction

Les matériaux composites sont des matériaux à très hautes performances mécanique, qui peuvent être façonnés à volonté au gré du concepteur ; de manière à obtenir les propriétés souhaitées en faisant un choix approprié des constituants. Ainsi la possibilité de façonner à la carte les matériaux modifie considérablement l'approche conventionnelle du dimensionnement des structures habituellement utilisée pour les matériaux traditionnelle. De nos jours le renforcement des structures par matériaux composites est devenu une alternative aux techniques conventionnelles reconnues, elle a attiré l'attention de plusieurs chercheurs dans le domaine de renforcement de structures pendant cette dernière décennie. Ainsi, le développement de l'utilisation des matériaux composites dans les structures nécessite de mettre en place les outils nécessaires à la modélisation du comportement mécanique des matériaux composites.

Parmi les nouvelles techniques de construction, la réhabilitation des ouvrages existants au moyen des matériaux composites se présente comme une solution efficace pour parer à certains phénomènes naturels. Le renforcement des structures par matériaux composites c'est devenu les techniques conventionnelles reconnues et les plus utilisées dans le domaine de renforcement des structures.

La application des matériaux composites pour le renforcement concerne les éléments soumises à la flexion dont le but d'améliorer ses capacités portantes vis-à-vis la flèche et/ou l'effort tranchant. Les matériaux composites consistent à coller des plaques composites à la face de tension inférieure d'une poutre en béton dans le but de la renforcer, l'adhésion du lamelle ou de la plaque composite sur la surface de la structure en béton armé provoque donc une modification de comportement structural comparativement à celui de la structure non renforcé.

L'objectif du présent chapitre est d'étudier le comportement mécanique des poutres non renforcées, ensuite, une étude plus détaillée sur le comportement mécanique et les mécanismes de rupture et le décollement du renfort dans l'élément ainsi renforcé, une attention particulière sera accordée à la zone de contact béton-composite appelée interface ainsi que les déverse théories permettant la modélisation des contraintes d'interface.

III.2. Comportements des poutres en béton armé renforcées par des plaques en matériaux composites sous chargement statique

Le PRF, étant un matériau de haute résistance à la traction, peut généralement être utilisé pour ses plus grands avantages, lorsqu'il est combiné avec du béton qui est résistant à la compression mais pauvre en tension. De telles applications comprennent le collage externe de PRF pour poutres en béton pour des fins de renforcement, ou structures en béton armé précontraint avec PRF.

Le collage de composite sur des surfaces tendues augmente la résistance ultime des poutres renforcées et en diminuant la flèche des structures figure (III.1), il augmente également leur raideur limitant ainsi la propagation des fissures. Ce phénomène permet de diminuer la corrosion des armatures et d'améliorer la durabilité des structures. Une des applications les plus courantes des matériaux composites pour le renforcement des structures en béton armé concerne les structures soumises aux sollicitations de flexion ou celles d'effort tranchant.

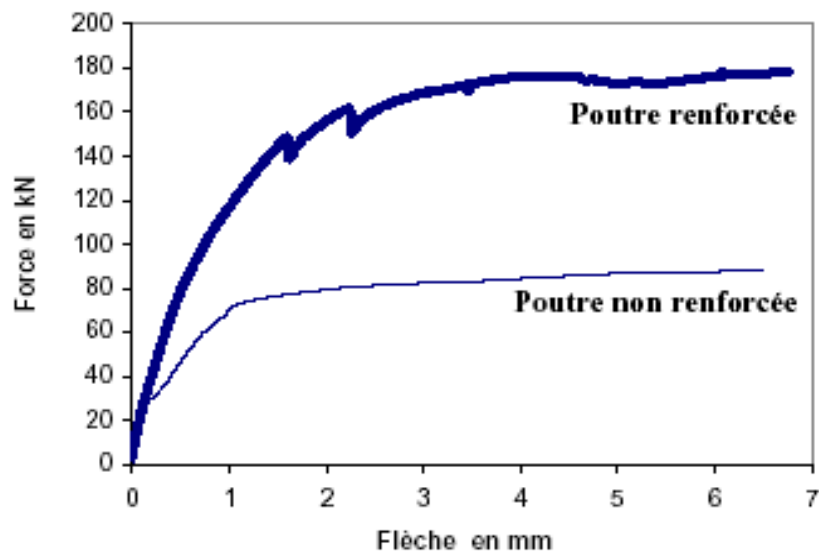


Figure III.1 : Comparaison de comportement entre les poutres renforcées et celle non renforcées [Boulaziz Anissa. 2014].

L'adhésion des lamelles composite sur des surfaces en béton armé provoque donc une modification des comportements structuraux comparativement à ceux des structures en béton armé non renforcées.

III. 2. 1. Comportement mécanique d'une section de poutre renforcée

Le comportement structural d'une poutre renforcée dépend de l'interaction de chacune des sections par exemple la relation entre la charge et la flèche ou les modes de rupture voir figure (III. 2).

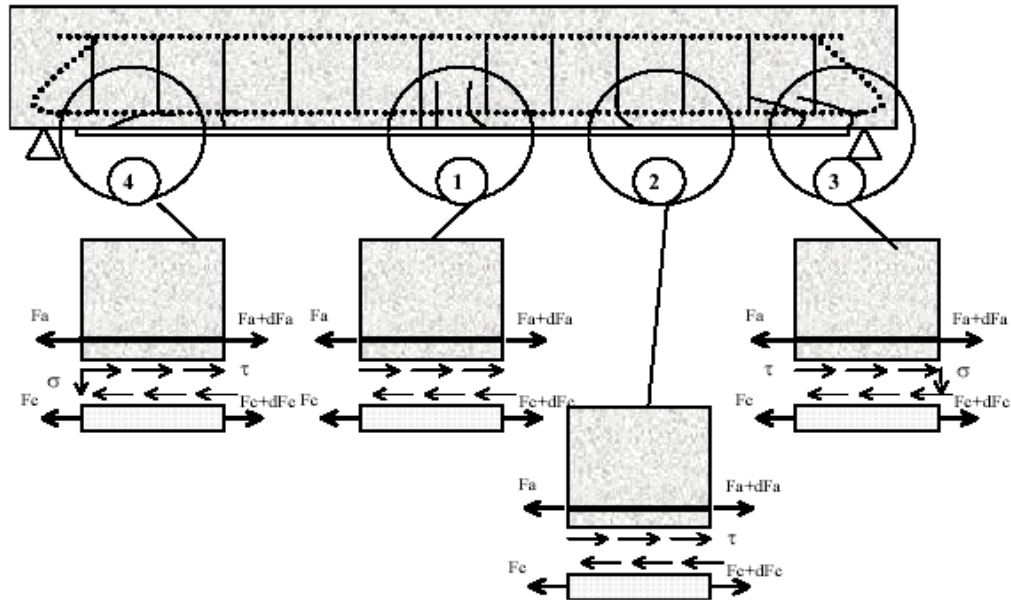


Figure III.2 : comportement structural d'une poutre renforcée [Sihem Kermiche.2007]

Nous allons décrire plus en détail le comportement mécanique de chaque section (section centrale, intermédiaire et d'extrémité [Avril S. 2002]).

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

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

La section d'extrémités (3 et 4) : Cette section est soumise à un couple d'efforts défini par de nombreux auteurs dont [Taljsten B.1997] , ceux-ci ont mis en évidence la présence de sur-contrainte d'extrémité et l'existence d'une sur-contrainte normale localisée en extrémité

de la plaque. La présence de ces sur-contraintes localisées à une influence notamment sur le mode de rupture. Deux cas peuvent se produire :

- le plan de collage n'est pas suffisamment résistant: la rupture se produit alors par décollement de la plaque composite ;
- Le plan de collage est suffisamment résistant, dans ce cas, les contraintes normales et tangentielles créent une rupture dans le béton situé entre les armatures et les aciers. La combinaison des actions normales et tangentielles permet la formulation d'un critère de rupture dit de peeling off.

III 2. 2. Mécanisme de rupture des poutres renforcées par matériaux composites

La combinaison des matériaux composites comme renforcement de poutres en béton armé produit de nouveaux modes de rupture. **Meier et al. (1992), Djelal et Coll. (1996)** ont présenté les principaux modes de rupture observés dans les poutres en béton armé renforcées extérieurement avec des lamelles ou plaques en matériaux composites, Ces mécanismes peuvent être regroupés en trois causes principales :

- Rupture due à la flexion.
- Rupture due au cisaillement.
- Rupture due au décollement.

III.2.2.1. Rupture due à la flexion

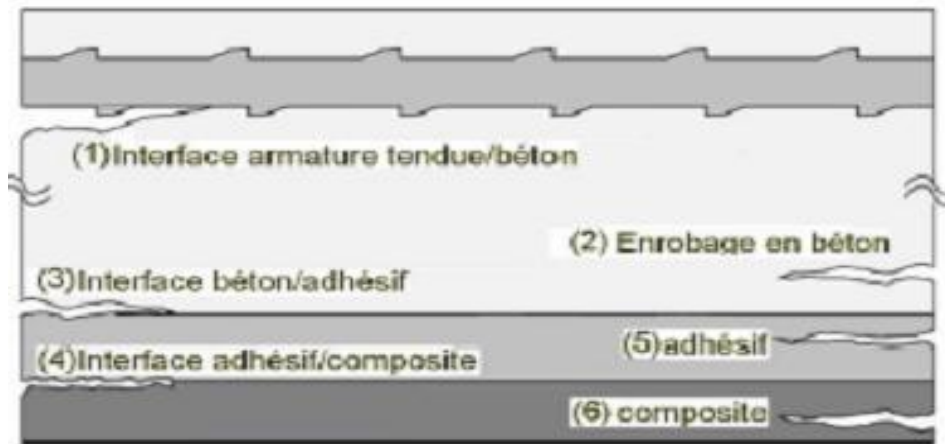
La rupture en flexion des poutres renforcées est provoquée soit par la ruine du béton comprimé, soit par l'importante plastification des armatures tendues, soit par la rupture en tension du composite. Le premier cas se produit brutalement lorsque les poutres sont fortement armées ; elles sont renforcées soit par trop d'armatures, soit par trop de plaque composite FRP. En revanche, les deuxième et troisième cas concernent des poutres faiblement ou moyennement armées. Lors du dimensionnement des éléments, c'est la rupture par plastification des armatures qui est visée.

III.2.2.2. Rupture due au cisaillement

La rupture de poutres renforcées due à l'effort tranchant se produit lorsque la résistance à l'effort tranchant des poutres sans renforcement est insuffisante. Les fissures apparaissent d'abord à partir des extrémités du composite longitudinales et sont inclinées vers le centre des sections droites de la poutre. Ce phénomène est dû à la concentration de contrainte provenant de la non continuité du composite.

III.2.2.3 Rupture due au décollement

La rupture de poutres renforcées due au décollement est la principale cause de la ruine d'éléments renforcés par le collage de plaques en composite. Le décollement peut se produire dans six parties différentes de la poutre (figure III.3). Entre l'armature tendue et l'enrobage en béton, dans l'enrobage en béton, entre le béton et l'adhésif du composite, entre l'adhésif et la plaque de composite, dans l'adhésif et dans le composite.



*Figure III. 3 : Différents types de décollements observés sur une poutre renforcée
[Buyukozturk O, Gunes O and Karasa E. 2004].*

Deux modes de rupture du décollement de la plaque ont été observées [Sebastian .2001]

Soit le décollement de la plaque débute à ses extrémités, puis se propage vers le centre de la rupture ; soit le décollement se produit localement dans les endroits où le moment fléchissant est le plus important. Ce décollement se propage éventuellement vers les extrémités de la plaque.

Le premier mode de rupture provient de la concentration à l'extrémité de la plaque.

La deuxième forme de rupture provient de l'importante déformation du FRP provoquée par la propagation de fissures dues à la combinaison des efforts tranchants et du moment fléchissant.

Le décollement aux extrémités de la plaque composite se produit habituellement lorsque trois conditions sont remplies :

- une faible portée de l'effort tranchant, ce qui produit un cisaillement important et un décollement entre le composite et la poutre, situé proche des appuis;
- les extrémités de la plaque composite sont éloignées des appuis;

- l'application de tissu raide empêchant la flèche et produisant une contrainte de cisaillement élevée près des extrémités de la plaque.

Le décollement de la plaque composite à partir des extrémités se produit souvent sur des poutres ayant une faible résistance à l'effort tranchant [Quantill R.J, Hollaway L.C and Throne A.M.1996]. En revanche, le décollement à mi- portée se produit sous les conditions suivantes :

- une portée importante de l'effort tranchant, un moment de flexion élevé qui se produit proche de la mi- portée;
- les extrémités du composite sont très proches des appuis;
- l'application de plaque composite mince.

III.2.3. Facteurs ayant une influence sur le comportement des poutres renforcées

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

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

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

III.2.3.1. Influence du rapport de la distance entre la charge et l'appui par rapport à la hauteur de la section (a_v / h)

Le rapport de cette expérience dépend de la distance entre la charge et l'appui à la hauteur de section (a_v/h) est un paramètre important vis-à-vis du mode de rupture des poutres renforcées. Une petite valeur d' a_v/h provoque souvent une rupture par effort tranchant. Pour

une poutre en béton armé, un rapport a_v/h supérieur à 6 conduit normalement à une rupture de flexion, un rapport a_v/h entre 2,50 et 6 conduit à une rupture par combinaison du moment et de l'effort tranchant [Hollaway I.c, Leeming M.B .2001].

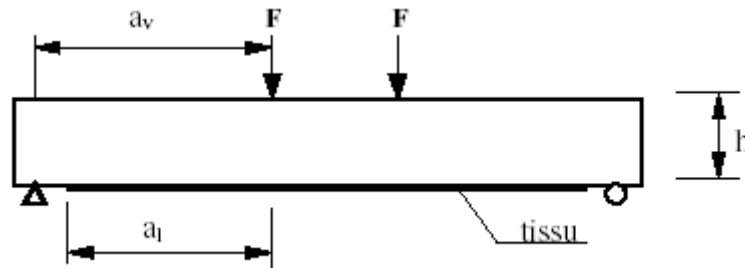


Figure III.4 : définition des paramètres [Sihem Kermiche.2007].

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

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

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

III.2.3.2. Influence du taux de renforcement des armatures tendues

Pour les poutres en béton armé renforcées par matériaux composites, le mode de rupture et le gain de résistance ultime apportée par le composite sont conditionnés par le taux de renforcement des armatures tendues. Nguyen a étudié des poutres $120 \times 150 \times 1500$ cm³ dont les taux de renforcement sont respectivement égaux à 0,39% et 4,36%. La rupture de la poutre faiblement armée renforcée (CFRP) est déterminée par une fissure d'effort tranchant près de l'extrémité de la plaque composite. En revanche, la rupture de la poutre fortement armée

provient de la rupture d'enrobage vers la mi- portée de poutre [Nguyen D.M, Chan T.K and Cheong H.K.2001].

rahimi et hutchinson [Rahimi et Hutchinson. 2001] ont effectué une étude similaire sur des poutres 200x150x2300 cm³ renforcées par CFRP, dont le taux de renoncement des armatures est $\rho_s = 0.65\%$ et 1.68% (voir figure III. 5).

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

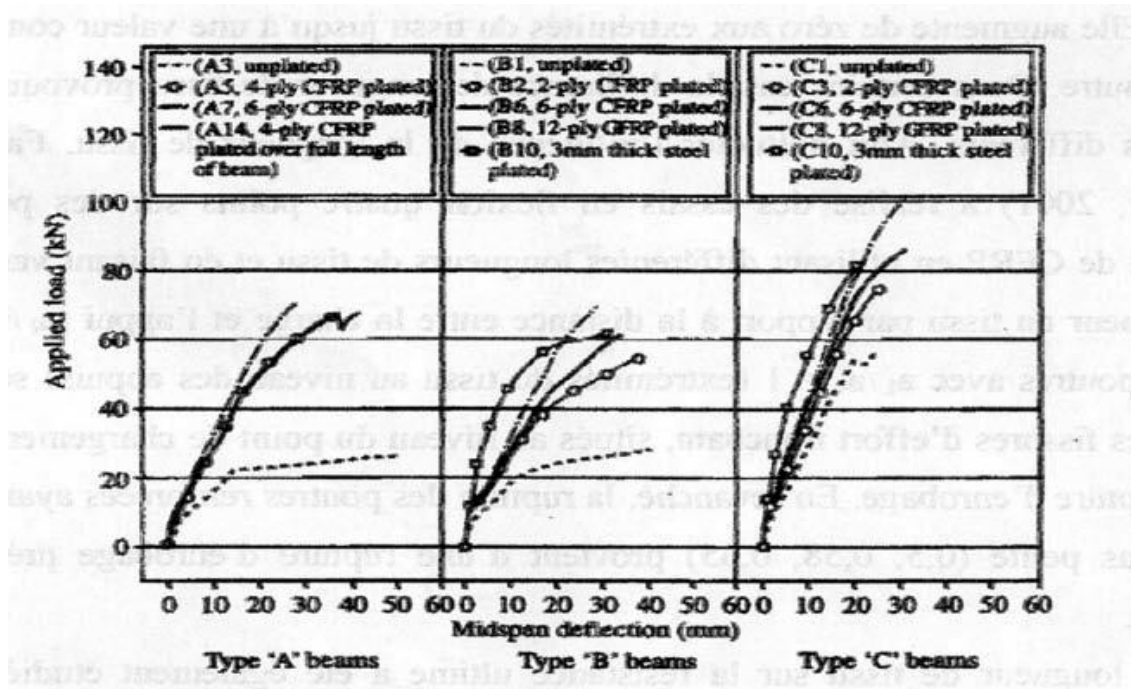


Figure III. 5 : influence de taux de renforcement des armatures tendues d'après[Rahimi et Hutchinson. 2001].

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

Pour des poutres faiblement ou moyennement armées, le renforcement par composite est efficace en terme de résistance ultime, d'où leur domaine d'application. Néanmoins, dans le cas d'une poutre sans armature tendue et renforcée d'un composite à fibre de verre (GFRP), la charge ultime mesurée est très inférieure à la valeur de calcul : la rupture prématurée de cette poutre provient de fissures très ouvertes dues au moment fléchissant, le composite dans les

zones fissurées se décollent : une quantité minimale d'armatures est ainsi nécessaire afin de limiter la largeur des fissures de flexion, et donc, d'éviter la rupture prématurée due au décollement du composite.

III.2. 3. 3. Influence de la longueur de la plaque composite

Afin d'étudier l'influence de longueur de plaque composite sur la résistance ultime a été également étudiée par Nguyen [Nguyen D.M, Chan T.K and Cheong H.K. 2001] et Fanning et Kelly [Fanning P.J, Kelly O. 2001] ont réalisé des essais en flexion quatre points sur des poutres renforcées du composite de CFRP en utilisant différentes longueurs de composite et en faisant varier le rapport de la longueur du composite par rapport à la distance entre la charge et l'appui (a_l/a_v) (Figure III. 4). Les poutres avec $a_l/a_v = 1$ (extrémité du composite au niveau des appuis) se sont rompues du fait des fissures d'effort tranchant, situées au niveau du point de chargement, qui provoquent une rupture d'enrobage. En revanche, la rupture des poutres renforcées ayant une valeur de a_l/a_v plus petite (0.5, 0.58 et 0.65) provient d'une rupture d'enrobage près des extrémités du composite

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

Les études réalisées sur des poutres réelles de 18 mètre de longueur dans le projet de

ROBUST [Hollaway L.C, Leeming M.B.2001] montre que, quelle que soit la longueur de composite, la rupture des poutres renforcées provient du décollement local de composite.

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

Tableau III.1 : Influence de la longueur du renforcement sur la résistance ultime et le mode de rupture (ρ : taux de renforcement des armatures tendues) [Boulaziz Anissa. 2014].

Etude	Portée de la poutre (cm)	Acier tendus	a_v/h	a/a_v	Charge ultime (kN)	Modes de rupture
Fanning et al, 2001	280	3R12 = 1,04 %	4,58	1	115	Rupture d'enrobage et décollement du composite
				0,65	102	Composite et l'enrobage
				0,58	81	séparés à l'extrémité
				0,50	72	de la plaque composite
Nguyen et al, 2001	133	3R10 = 1,64 %	2,93	□1	118	Ruine du béton comprimé
				0,80	58,90	Composite et l'enrobage
				0,74	57,30	séparés à l'extrémité
				0,57	56,20	de la plaque composite
Quantrill et al, 1996	90	3R6 = 1,20 %	3	0,93	40,80	Composite et l'enrobage séparés à l'extrémité de la plaque composite
				□1	63,50	séparés à l'extrémité
Hollaway et lemming 2001	1800	précontraint	10,60	0,85	72	
				0,63	77	Décollement local du
				0,20	60	Composite

De ce tableau on constate que :

- pour $a_v/h < 3$ (poutre courte), la longueur du renforcement inférieur ($a/a_v < 1$) n'a que peu d'influence sur la valeur de résistance ultime
- pour $a_v/h = 4.58$ la longueur du tissu influe sur la résistance de la poutre renforcée
- pour $a_v/h = 10.6$ (poutre longue), la longueur du renforcement ($a/a_v < 1$) influe peu sur la valeur de la résistance ultime

III.2. 3. 4. Influence de la quantité du composite

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

Dans les études de Rahimi [KHELIFA Z. et FATEH N.2009], le composite fibre de carbone de différentes épaisseurs a été appliquée au renforcement de poutres faiblement ou

normalement armées à l'effort tranchant (taux de renforcement à l'effort tranchant égal à 0,19% et 0,38%, Les résultats de ces études sont synthétisés dans le Tableau (III.2).

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

Auteur	Section de composite mm ²		Charge ultime (kN)	Modes de rupture
Poutres faiblement armées à l'effort tranchant (cadres : 0,13 0,19 %)				
Grace 2001	60	1,40 %	163	Décollement du composite dû aux
	120	1,40 %	156	fissures d'effort tranchant
Rahimi 2001	120	0,65 %	63	Séparation d'enrobage et décollement
	180	0,65 %	65	de composite provenant de l'effort tranchant
Poutres fortement armées à l'effort tranchant (cadres : 0, 38 %)				
Grace 2001	120	1,40 %	163	Décollement du composite dû a la
	180	1,40 %	178	combinaison de l'effort tranchant et du moment fléchissant
	60	0,65 %	54	Séparation d'enrobage et
Rahimi 2001	180	0,65 %	70	décollement du composite
	60	1,68 %	76	Ruine du béton comprimé et
	180	1,68 %	102	décollement du composite

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Dans ce sens les études de Kotynia et Henris [kotynia R, Harries K.A. 2006], montrent qu'après la révision du comportement de décollement et l'étude expérimentale qu'ils ont effectuée, qu'un bas rapport d' a_v/h est un moyen efficace pour éviter le décollement à l'extrémité même. Ils ont recommandés de négliger le renforcement latéral de CFR, et d'utiliser l'ancrage d'appui avec un rapport d' a_v/h égal à 2.7.

III.3. Conclusion

Renforcer des poutres en béton armé par collage de matériaux composites est une technique efficace. La présence de matériaux composites sur les surfaces tendues améliore considérablement la résistance ultime et la raideur structurale de poutres renforcées en diminuant la propagation de fissures, particulièrement en cas d'une poutre faiblement ou moyennement armée en partie tendue. Cette efficacité est conditionnée par plusieurs facteurs, comme le taux de renforcement des armatures tendues, la résistance à l'effort tranchant de poutre sans renforcement, les paramètres géométriques de la poutre, la résistance de béton etc.

Le décollement du composite aux extrémités du renforcement ou celui proche de la mi-portée de la poutre est la raison principale provoquant la rupture prématurée des poutres renforcées. Le décollement de la plaque composite est dû à la concentration de contrainte de cisaillement ou à une fissure très ouverte due au moment fléchissant.

Chapitre IV

*Analyse des contraintes
d'interface d'une poutre console en
béton armé renforcées par
matériaux composites*

IV.1.Introduction

Le renforcement des poutres en béton à l'aide de plaques de composite FRP représente une nouvelle technologie dans le domaine du génie civil. En fait, jusqu'à une époque très proche, la méthode la plus commune dans le renforcement de structure a été la technique concernant l'application de plaques d'aciers.

La nouvelle méthode qui utilise le collage de plaques de composite dans le renforcement des ouvrages en génie civil est devenue une solution prometteuse et efficace par leurs excellentes propriétés telles que légèreté, résistance, durabilité et un aspect non corrosif. le mode de rupture le plus important de ces élément renforcés est le décollement de la plaque composites en raison des contraintes d'interfaces élevées à la proximité du bord de la plaque collée. Des prédictions exactes de telles contraintes sont donc nécessaires pour prévoir ce mode de ruine.

Plusieurs solutions ont été développées dans cette dernière décennie pour estimer l'intensité des contraintes d'interface dans les poutres renforcées par des plaques en acier ou des plaques composites [Vilnary O. 1988], [Roberts T.M. 1989], [Roberts T.M and Hadji-kazemi H. 1989], [Smith S.T and Teng J.G.2001]. Toutes ces solutions sont données pour un comportement élastique linéaire des matériaux et sont fondées sur une hypothèse clé qui stipule que la couche d'adhésif est soumise à une répartition linéaire des contraintes normales et de cisaillement à travers son épaisseur. C'est cette supposition qui permet d'obtenir une solution relativement simple. Une nouvelle méthode d'étude des contraintes d'interface réalisée par [Xue Jun He .2019] sera présentée ; cette dernière repose sur la distribution parabolique des déformations de cisaillement.

Dans le présent chapitre, nous allons présenter, une solution simple en vue de déterminer les contraintes d'interface au niveau de la couche d'adhésif d'une poutre renforcée par matériaux composite.

IV.2. Analyse mathématique

Un élément infinitésimal de la poutre renforcée est illustré à la figure (V.2) 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.

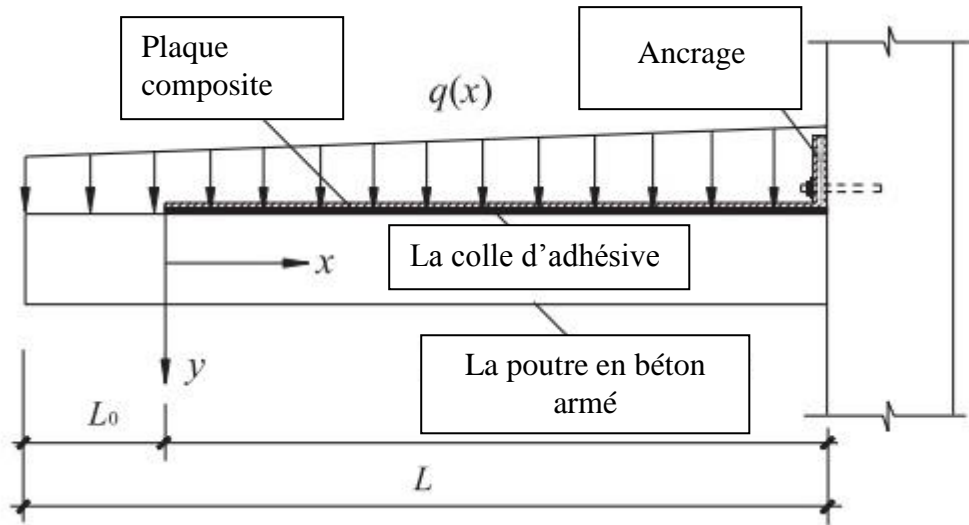


Figure IV.1 : Poutre console renforcée par des plaques en matériaux composites.

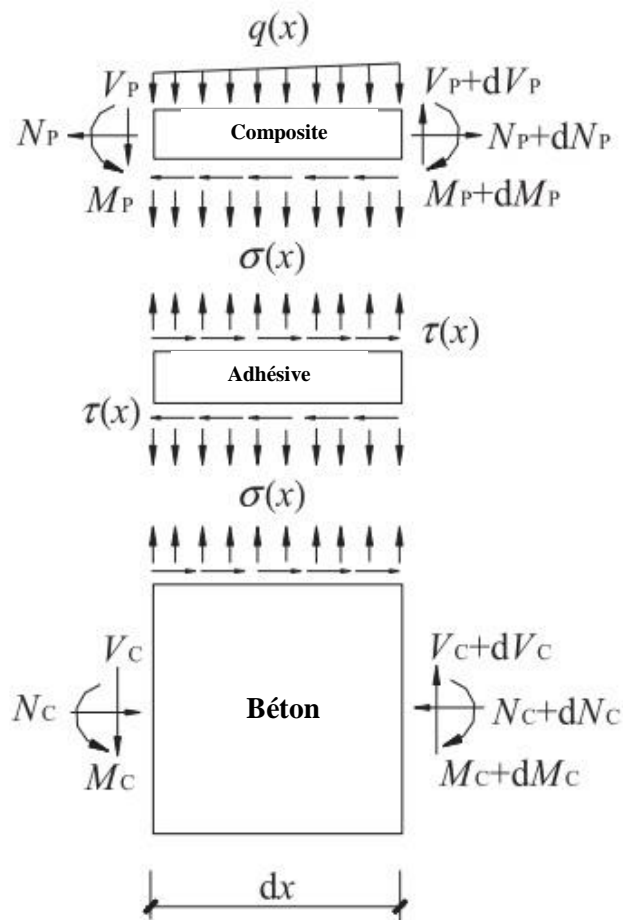


Figure IV.2 : Un segment différentiel de la poutre en béton renforcée par composite.

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.

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

$$\varepsilon_c(x) = \frac{du_c(x)}{dx} = \frac{y_c}{E_c I_c} M_c(x) + \frac{N_c}{E_c A_c} + \frac{t_c}{4G_c} \frac{d\tau_a}{dx} \quad (IV.1)$$

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

$$\varepsilon_p(x) = \frac{du_p(x)}{dx} = A'_{11} \frac{N_p(x)}{b_p} - D'_{11} \frac{y_p}{b_p} M_p(x) \quad (IV.2)$$

Où $u_c(x)$ et $u_p(x)$ sont les déplacements horizontaux de la poutre en béton et la plaque composite respectivement. $M_c(x)$ et $M_p(x)$ sont respectivement les moments de flexion appliqués à la poutre en béton et la plaque composite ; E est le module de Young du béton ; I_c le moment d'inertie N_c et N_p sont les forces axiales appliquées au béton et à la plaque composite respectivement, b_p et t_p sont la largeur et l'épaisseur de la plaque de renforcement , $[A']=[A^{-1}]$ est l'inverse de la matrice de membrane $[A]$, $[D']=[D^{-1}]$ est l'inverse de la matrice de flexion.

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

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

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

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

Où $V_c(x)$ 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_c la largeur de la poutre en béton.

$$\text{Le moment d'équilibre : } \frac{dM_c}{dx} = V_c(x) - \tau(x)b_p \cdot y_c \quad (\text{IV.5})$$

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

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

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

$$\text{Le moment d'équilibre : } \frac{dM_p}{dx} = V_p(x) - \tau(x)b_p \cdot y_p \quad (\text{IV.8})$$

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

IV.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 :

$$\tau(x) = K_s \Delta u(x) = K_s [u_p(x) - u_c(x)] \quad (\text{IV.9})$$

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

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

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

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

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = K_s \left[\left(A_{11} \frac{N_p(x)}{b_p} - D_{11} \frac{y_p}{b_p} M_p(x) \right) - \left(\frac{y_c}{E_c I_c} M_c(x) + \frac{N_c}{E_c A_c} + \frac{t_c}{4G_c} \frac{d\tau_a}{dx} \right) \right] \quad (\text{IV.11})$$

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

$$M_c(x) = RM_p(x) \quad (IV.12)$$

Avec :

$$R = \frac{E_c I_c D'_{11}}{b_p} \quad (IV.13)$$

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

$$M_T(x) = M_c(x) + M_p(x) + N(x)(y_c + y_p + t_a) \quad (IV.14)$$

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

$$N(x) = N_c(x) = N_p(x) = b_p \int_0^x \tau(x) dx \quad (IV.15)$$

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

$$M_c(x) = \frac{R}{R+1} \left[M_T(x) - b_p \int_0^x \tau(x)(y_c + y_p + t_a) dx \right] \quad (IV.16)$$

$$M_p(x) = \frac{1}{R+1} \left[M_T(x) - b_p \int_0^x \tau(x)(y_c + y_p + t_a) dx \right] \quad (IV.17)$$

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

$$\frac{dM_c(x)}{dx} = \frac{R}{R+1} \left[V_T(x) - b_p \tau(x)(y_c + y_p + t_a) \right] \quad (IV.18)$$

$$\frac{dM_p(x)}{dx} = \frac{R}{R+1} \left[V_T(x) - b_p \tau(x)(y_c + y_p + t_a) \right] \quad (IV.19)$$

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

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} = K_s \left[\frac{A'_{11}}{b_p} \frac{dN_p(x)}{dx} - D'_{11} \frac{y_p}{b_p} \frac{dM_p(x)}{dx} - \frac{y_c}{E_c I_c} \frac{dM_c(x)}{dx} + \frac{1}{E_c A_c} \frac{dN_c(x)}{dx} - \frac{t_c}{4G_c} \frac{d^2\tau_a}{dx^2} \right] \quad (IV.20)$$

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

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} - K_1 \left(A'_{11} + \frac{b_p}{E_c A_c} + \frac{(y_c + y_p)(y_c + y_p + t_a)}{E_c I_c D'_{11} + b_p} b_p D'_{11} \right) \tau(x) + K_1 \left(\frac{(y_c + y_p)}{E_c I_c D'_{11} + b_p} D'_{11} \right) V_T(x) = 0 \quad (IV.21)$$

Avec :

$$K_1 = \frac{1}{\left(\frac{t_a}{G_a} + \frac{t_c}{4G_c} \right)} \quad (IV.22)$$

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

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

Avec :

$$\lambda^2 = K_1 \left(A'_{11} + \frac{b_p}{E_c A_c} + \frac{(y_c + y_p)(y_c + y_p + t_a)}{E_c I_c D'_{11} + b_p} b_p D'_{11} \right) \quad (IV.24)$$

$$m_1 = \frac{K_1}{\lambda^2} \left(\frac{(y_c + y_p)}{E_c I_c D'_{11} + b_p} D'_{11} \right) \quad (IV.25)$$

Après l'introduction des conditions initiales l'équation (IV.23) devient :

$$\tau(x) = \left(\frac{q}{2\lambda} \cdot e^{-\lambda x} \right) (2 \cdot m_1 + m_2 \cdot a^2) + m_1 \cdot q \cdot (a + x); m_2 = \frac{y_c K_1}{E_c I_c} \quad (IV.26)$$

IV.2.2. La distribution des contraintes normales dans l'interface composite – Acier

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{d^2 w_c(x)}{dx^2} = -\frac{M_c(x)}{E_c I_c}, \quad \frac{d^2 w_p(x)}{dx^2} = -\frac{D'_{11} M_p(x)}{E_p I_p} \quad (IV.30)$$

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

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

$$\text{Adhérent 1 :} \quad \frac{d^4 w_c(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_c I_c} b_p \sigma_n(x) + \frac{y_c}{E_c I_c} b_p \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_c I_c} \quad (IV.31)$$

$$\text{Adhérent 2 :} \quad \frac{d^4 w_p(x)}{dx^4} = -D'_{11} \sigma_n(x) + D'_{11} y_p \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (IV.32)$$

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

$$\frac{d^4 \sigma_n(x)}{dx^4} + K_n \left(D'_{11} + \frac{b_p}{E_c I_c} \right) \sigma_n(x) - K_n \left(D'_{11} y_p - \frac{y_c b_p}{E_c I_c} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q K_n}{E_c I_c} = 0 \quad (IV.33)$$

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

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

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

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

Ou :

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_n}{4} \left(D'_{11} + \frac{b_p}{E_c I_c} \right)} \quad (IV.36)$$

$$n_1 = \left(\frac{y_c b_p - D'_{11} E_c I_c y_p}{D'_{11} E_c I_c + b_p} \right) \quad (IV.37)$$

$$n_2 = \frac{1}{D'_{11} E_c I_c + b_p} \quad (IV.38)$$

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

$$C_1 = \frac{K_n}{2\beta^3 E_c I_c} [V_T(0) + \beta M_T(0)] - \frac{n_3}{2\beta^3} \tau(0) + \frac{n_1}{2\beta^3} \left(\frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \quad (IV.39)$$

$$C_2 = -\frac{K_n}{2\beta^2 E_c I_c} M_T(0) - \frac{n_1}{2\beta^2} \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \quad (IV.40)$$

Ou :

$$n_3 = b_p K_n \left(\frac{y_c}{E_c I_c} - \frac{D'_{11} y_p}{b_p} \right) \quad (IV.41)$$

IV.3. Présentation du modèle étudié

La présente méthode a été validée en comparant les résultats des contraintes d'interface avec ceux obtenus à partir de la méthode de [Xue Jun He .2019].

Pour cela, une poutre en béton renforcée par une plaque en fibre de carbone (CFRP) est analysée. La poutre, ayant une travée de 3000 mm, est simplement appuyée et soumise à une charge uniformément répartie d'une valeur de 50 KN/m. La distance de l'appui au bord de la plaque de renforcement est de 300 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	$b_1 = 200 \text{ mm}$	$t_1 = 300 \text{ mm}$	$E_1 = 30\,000 \text{ MPa}$
Plaque composite	$b_2 = 100 \text{ mm}$	$t_2 = 4 \text{ mm}$	$E_2 = 140\,000 \text{ MPa}$
Adhésif	$b_a = 100 \text{ mm}$	$t_a = 2 \text{ mm}$	$E_a = 3\,000 \text{ MPa}$

Les résultats obtenus, en utilisant la méthode développée par [Xue Jun He .2019] ainsi que ceux de la présente méthode, pour les contraintes de cisaillement et contraintes normales d'interface, sont illustrés dans la figure (IV.3).

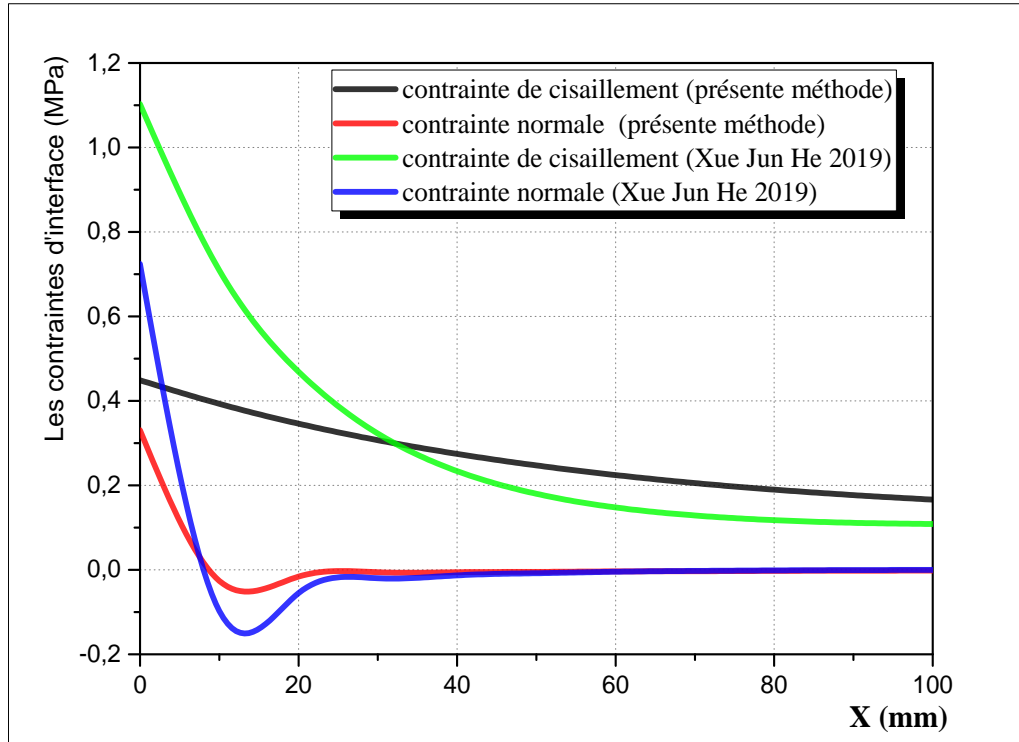


Figure IV.3. : La comparaison entre la présente méthode et le modèle [Xue Jun He.2019]

Les deux solutions présentent des valeurs maximales (au bord de la plaque), dans notre présente méthode on constate que les contraintes d'interface sont aux niveaux minimaux par rapport au modèle [Xue Jun He.2019], puis diminuent rapidement pour atteindre la valeur zéro à mi travée.

IV.4. L'étude paramétrique

IV.4.1 Effet de la longueur non renforcée a :

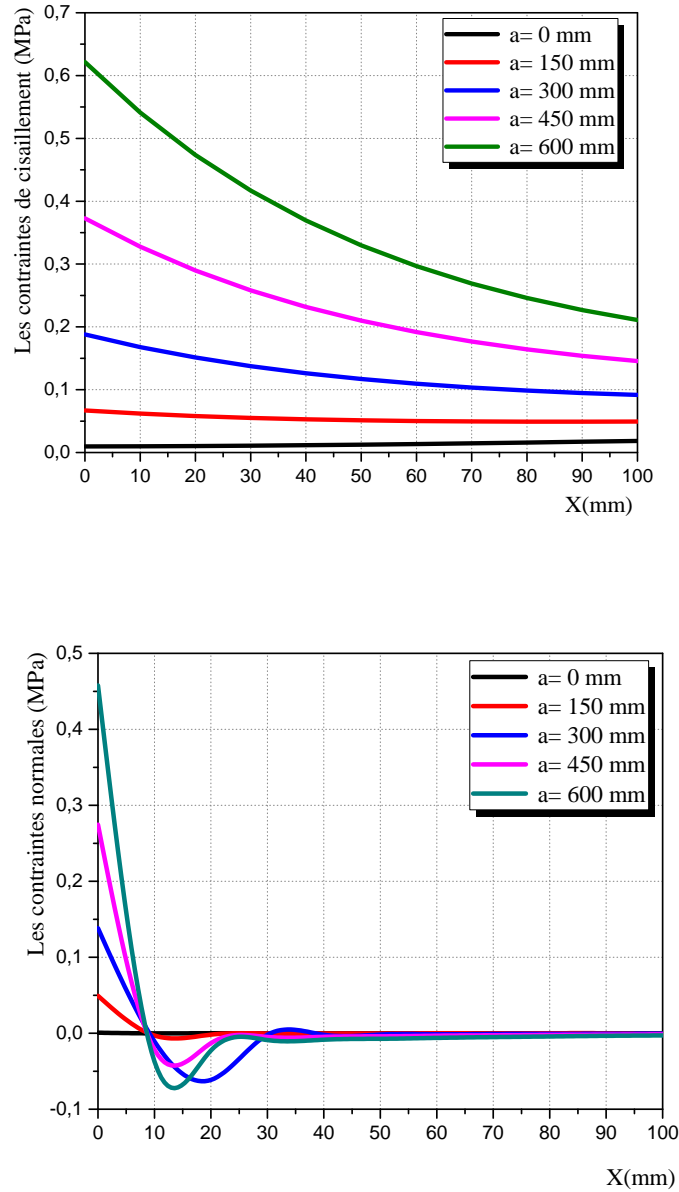


Figure IV.4. : Effet de la longueur non renforcée sur les contraintes d'interface d'une poutre console en béton armé renforcée par composite.

L'influence de la longueur « a » (longueur entre le bord de la plaque et le support) sur les contraintes d'interface maximales est présentée sur la figure IV.4. On constate que, plus la longueur « a » augmente (c'est à dire la longueur de la plaque L_p diminue) plus les contraintes d'interface maximales (contraintes au bord de la plaque) s'accroissent d'une façon significative.

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

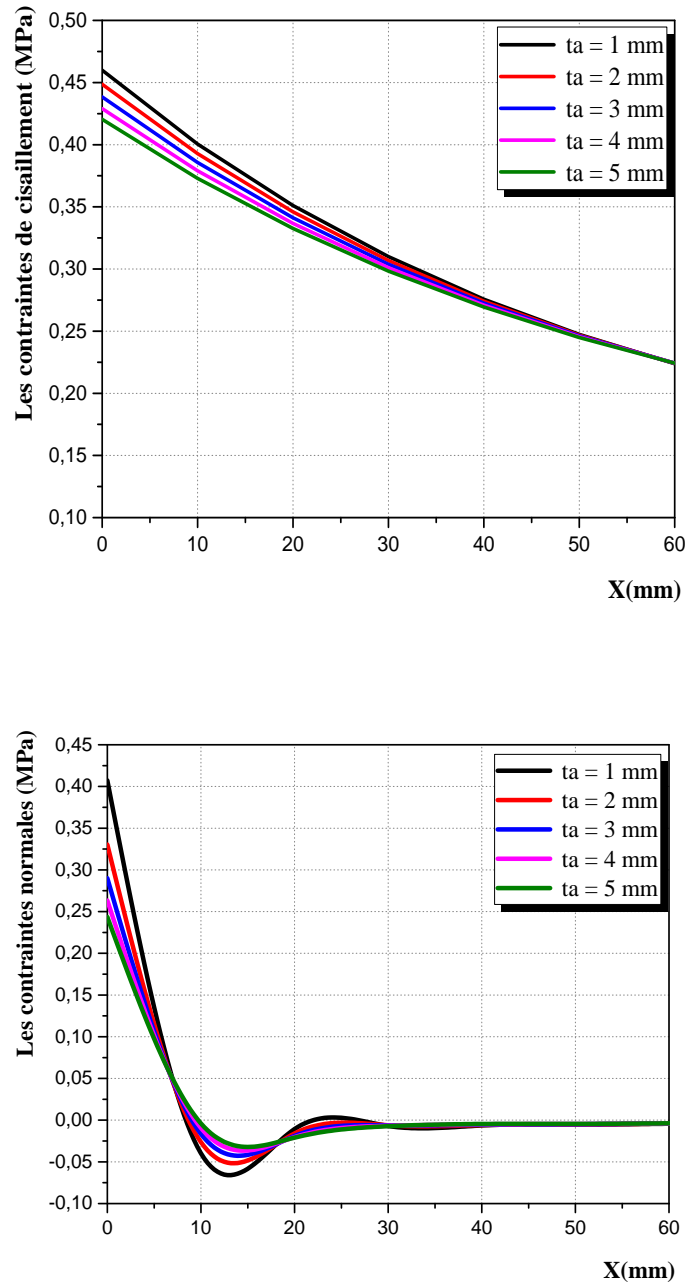


Figure IV.5. Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive sur les contraintes d'interface.

L'effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive « t_a » sur la variation des contraintes d'interface maximales est présenté sur la figure IV.5. Lorsque l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésive « t_a » mène à une réduction significative des contraintes d'interface maximale (contraintes au bord de la plaque).

IV.4. 4. Effet de la rigidité de la colle E_a :

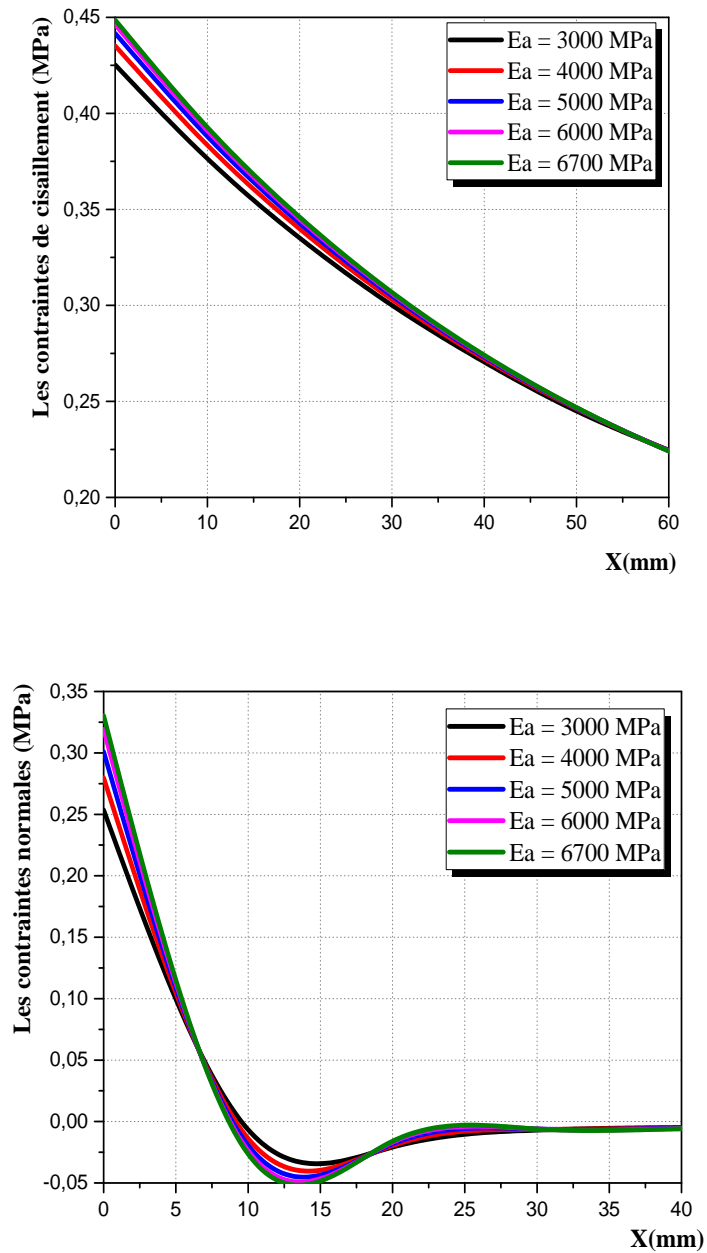


Figure IV.6: Effet de la rigidité de la colle d'une poutre sur les contraintes d'interface.

L'effet de la rigidité de la colle « E_a » sur les contraintes d'interface maximales est présentées sur la figure IV.6. Lorsque la rigidité de la colle « E_a » augmente plus les contraintes d'interface maximales (contraintes en extrémité de la plaque) s'accroissent d'une façon significative.

IV.4.5. Effet de la hauteur de la poutre t_1 :

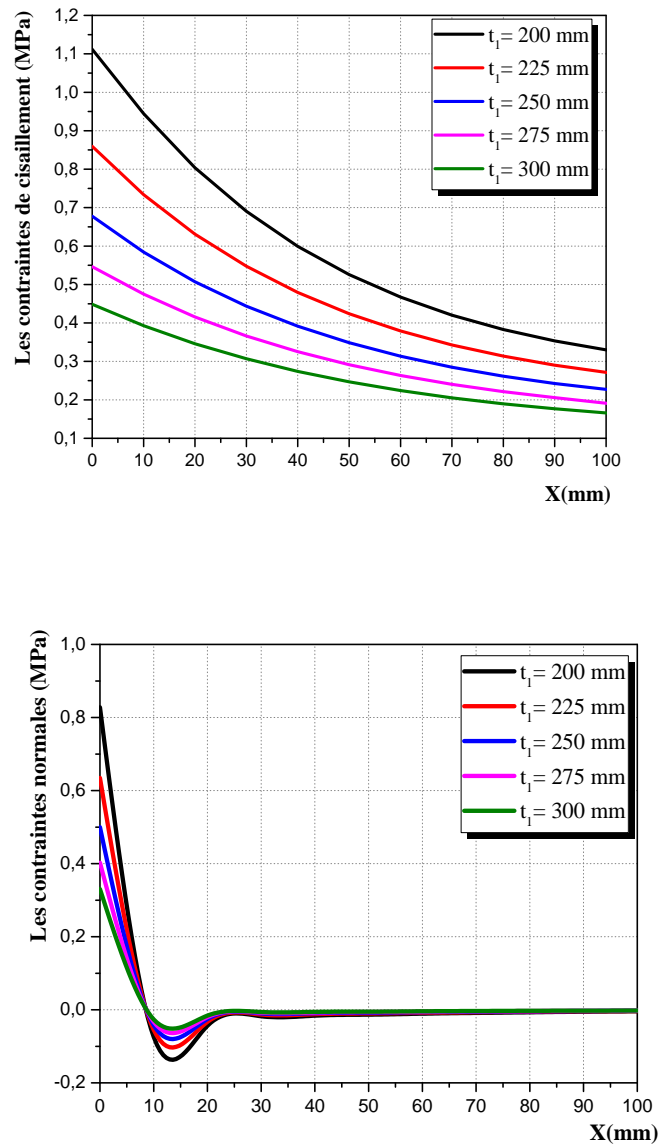


Figure IV.7: Effet de la hauteur de la poutre sur les contraintes d'interface.

L'effet de la hauteur de la poutre « t_1 » sur les contraintes d'interface maximales est présentées sur la figure IV.7. On constate que, plus la hauteur « t_1 » augmente plus les contraintes d'interface minimales (contraintes au bord de la plaque) diminué d'une façon remarquable.

IV.4. 6. Effet de la rigidité de la poutre E1:

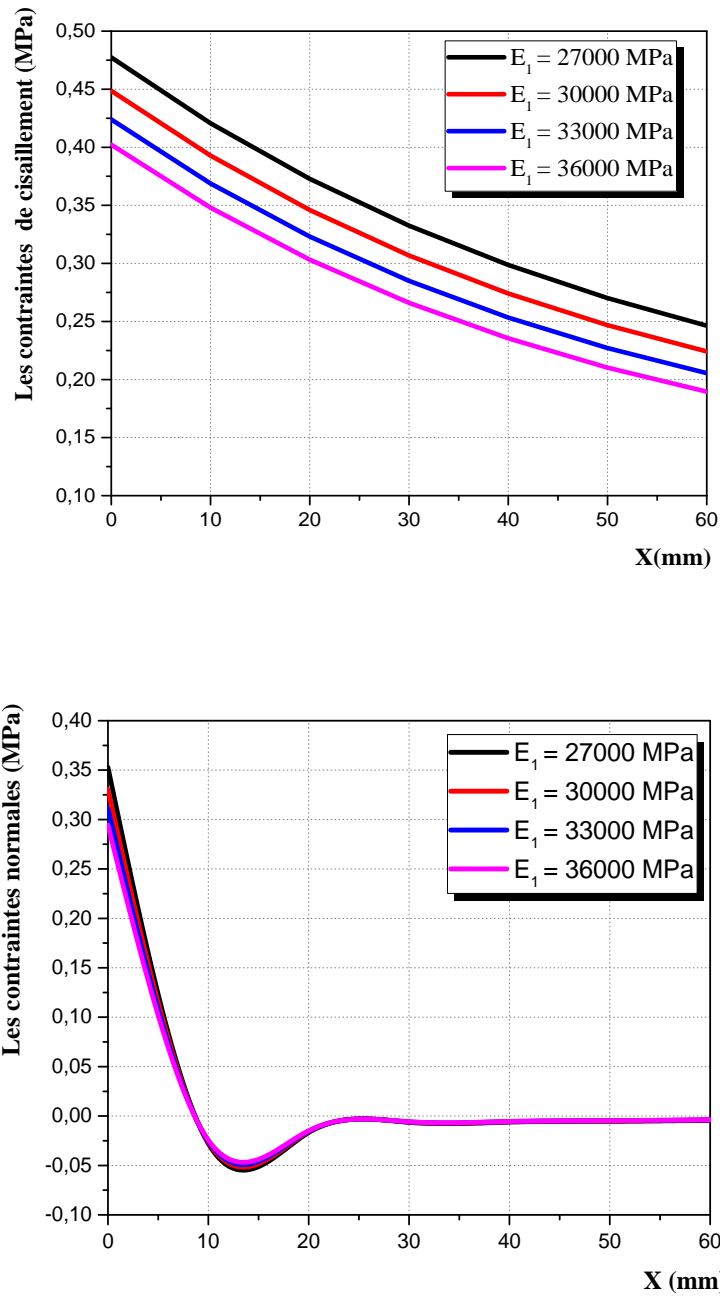


Figure IV.8. Effet de la rigidité de la poutre $E1$ sur les contraintes d'interface.

L'influence de la rigidité de la poutre « $E1$ » sur les contraintes d'interface maximales est présentées sur la figure IV.8. Lorsque l'augmentation de la rigidité de la poutre « $E1$ » mène à une réduction significative des contraintes d'interface maximale (contraintes en extrémité de la plaque).

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, une nouvelle analyse théorique des contraintes d'interface dans les poutres en béton armé endommagées renforcée par une plaque composite 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 la méthode [Xue Jun He .2019].

L'étude paramétrique, menée dans ce chapitre, 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 augmente.
- Prolonger le plus possible la longueur de la plaque de renforcement aux appuis, réduit les contraintes aux bords.
- Le maximum des contraintes normales et de cisaillement d'interface augmente avec L'accroissement de la rigidité de la colle.
- L'augmentation de la rigidité et la hauteur de la poutre plus les contraintes d'interface minimales.

Conclusion générale

Conclusion générale

Nous avons, dans la présente étude une modélisation sur les contraintes d'interface béton composite d'une poutre console en béton armé renforcée par matériaux composites sous chargement en flexion. Cette étude vient confirmer et compléter certains points précédemment menés sur ce sujet.

Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié, en se basant sur le développement de la méthode de [Xue Jun He .2019], les contraintes d'interface au niveau de la couche d'adhésif d'une poutre renforcée par matériaux composite.

L'effet des paramètres liés à la géométrie de la plaque de renforcement (Longueur, épaisseur et largeur), l'épaisseur et la rigidité de la couche d'adhésif, la hauteur et la rigidité de la poutre. Afin de compléter cette étude paramétrique a été réalisée afin de mettre en évidence l'effet des différents paramètres sur la distribution des contraintes d'interface dans une poutre en béton renforcée par matériaux composites Les conclusions tirées de la présente recherche sont les suivantes :

- Prolonger le plus possible la longueur de la plaque de renforcement aux appuis, réduit les contraintes aux bords.
- L'augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésif plus les contraintes d'interface minimales par contre ils augmentent avec l'augmentation de la rigidité de la couche.
- L'augmentation de la rigidité et la hauteur de la poutre plus les contraintes d'interface minimales.
- 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.

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

- Effectuer des études numériques par des logiciels de modélisations et confronter les résultats qui seront trouvés avec ceux calculés par les modèles analytiquement établis;

- Effectuer une étude technico-économique sur les systèmes renforcés;
- Utiliser d'autres types de renfort par exemple les FGM et voir leur impact sur l'intégrité de l'interface.
- L'intensification de l'expérimentation en lien direct avec le sujet.

Référence bibliographique

[**Ait Ameer Meziane M.2008**] Ait Ameer Meziane M. Modélisation du décollement des structures hybrides Composite Béton. Université Djillali Liabes de Sidi Belabbes, Thèse de Doctorat.

[**Andrade (c.), et al 2001**]Andrade (C.), Alonso (C.), Arteaga (A.) et Tanner (P.) Methodology based on the electrical resistivity for the calculation of reinforcement service life. *l'industria italiana del cemento* N° 764, pp 330-339, avril 2001

[**B. Agoudjil. 2008**] "A comparative analysis of dielectric, rheological and thermophysical behaviour of ethylene vinyl acetate/BaTiO₃ composites," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 41, pp. 1-7.

[**Badour S. 2018**] «Utilisation des matériaux composites pour la réparation parasismique en béton armé» Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master. Université Ibn Khaldoun Tiaret.

[**Boulaziz A.2014**], Analyse des contraintes d'interfaces dans les poutres en béton armé renforcées par des stratifiés en fibre de carbone : Effet de fluage. Université Ibn Khaldoun Tiaret. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master.

[**Buyukozturk O, Gunes O and Karasa E. 2004**]“Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites ”. *Construction and Building Materials*, 18, 9-19.

[**C. LORRETTE. 2007**] "Outils de caractérisation thermo physique et modèles numériques pour les composites thermo structuraux à haute température," l'Université Bordeaux 1.

[**C. PROFETA and M. THOUVENIN .2004**] "Mesure Des Propriétés Thermophysiques," *Projet de mécanique 1ère année Ecole des Mines de Nancy*, pp. 1-25.

[**CAL .1997**] CALGARO, J.A., LACROIX, R. (dir.), *Maintenance et réparation des ponts*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

[**Châtain, M.2001**] Matériaux composites: présentation générale. *Techniques de l'ingénieur. Plastiques et composites, (AM5000), AM5000-1.*

[**Chedad.A.2016**] Analyse des contraintes d'interface d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque en FGM, , Mémoire de fin d'étude, UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET.

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

[**D. M. Bigg. 1995**] "Thermal Conductivity of heterophase Polymer Compositions," Advances in Polymer Science, vol. 119, pp. 1-30.

[**Daniel Gay .1997**]**« Matériaux composites »** 4e édition revue et augmentée, Edition Hermes.

[**E. J. JULES. 2001**] "Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites thermodurcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l'hystérésis diélectrique." ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARTS ET METIERS.

[**F. P. Incropera and D. P. DeWitt. 2002**]" Fundamentals of heat and mass transfer", fifth ed.

[**Fanning P.J, Kelly O. 2001**] ultimate response of RC beams strengthened with CFRP plates. ASCE journal of composite for construction. May 2001, pp.122-127.

[**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.

[**Garden H.N and Holloway L.C.1998**] Garden H.N and Holloway L.C., "An experimental study of the failure modes of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composite plates". Composites Part B, 29B, 411-424.

[**GHERDAOUI Moufida,2018**] « Renforcement des ouvrages en beton arme soumis aux actions gravitaires avec materiaux composites » Thèse de Doctorat LMD.

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

[**Hadadi Manel. 2011**] « Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés thermophysiques des matériaux composites à matrice polymère ». Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master. Université El Hadj Lakhdar Batna.

[**Hamlaoui Salim. 2012**], mémoire magister, Maintenance, entretien et réparation des ponts, Université Mohamed Khider – Biskra,

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

[**Hollaway I.c, Leeming M.B .2001**]strengthening of reinforced concrete structures- using externally- bonded FRP composite in structural and civil engineering, Woodhead publishing Limited, Cambridge England, first published 1999, reprinted 2001.

[**I. Krupa, A. Boudenne, and L. Ibos .2007**] "Thermophysical properties of polyethylene filled with metal coated polyamide particles," European Polymer Journal, vol. 43, pp. 2443 - 2452.

[**ITMAIZEH Ehab .2016**] « Pathologie de structures en béton armé » Mémoire de Master académique, Université de Larbi Tébessi.

[**J. T. Mottram and R. Taylor. 1991**] "Thermal transport properties," International encyclopedia of composite, pp. 476-496.

[**J.M. Berthelot .1999**]« Comportement mécanique et analyse des structures de matériaux composites » 3ième édition. Ed. TEC et DOC Paris.

[**Jean-Pierre OLLIVER et Angélique VICHOT,2008**] «*La durabilité des bétons*» Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, France, 867 p.

[**Kaouadji Mohammed Salim .2013**] « Degradations au niveau de l'usine al zinc constats et recommandations » Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master en Génie Civil, Université de Tlemcen.

[**Kherbouche Laaziz. 2010**] « Introduction aux modélisations et méthodes de calcul des matériaux composites ». Mémoire de Magister Université Mouloud Mammeri Tizi-ouzou

[**Koizumi, M. 1993**] "The concept of FGM, ceramic transactions", Funct Grad Mater, **34**, 3–10.

[**Kotynia R, Harries K.A. 2006**] strain efficiency and limit states of externally bonded and near-surface mounted CFRP-strengthened RC members, Composites B (under review).

[**Laurent Gornet. 2011**] Généralités sur les Matériaux Composites, École Centrale de Nantes.

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

[**Luyckx J. 1999**] Composites à fibres de carbone dans le génie civil, Techniques de l'Ingénieur, traité de construction, C5 440.

[**M. Manuelian and R. Campbell. 2008**] "Thermal Diffusivity, Specific Heat, and Thermal conductivity Measurement Using NETZSCHLFA 447Nanoflash," Netzsh Instrument Inc.

[**Maalem H.1988**] Expertise du supermarché de la ville de Annaba", Agence de Annaba, CTC\Est.

[**Mahamat Oumar Andjami .2013**] «Analyse du comportement mécanique des poutres métalliques renforcées par collage externe des plaques composites» Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master. Université Ibn Khaldoun Tiaret.

[**NET 01**] <http://www.concretecorrosion.net>

[**NET 02**] <http://www.sika.com>

[**NET 03**] <http://www.borflex-composites.fr/>

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

[**Nguyen Dai Mink, Chan Toong Khuan and Cheong Hee Kiat .2001**] «Effect of plate length on the strength of reinforced concrete beams bonded with CFRP plates brittle failure and development length of CFRP-concrete beams», journal of composite for construction. ASCE vol5, no.1, pp : 12-17.

[**Ould El Hacen Zein El Abidine . 2016**] « Renforcement du béton Par les matériaux composites » Mémoire de Master Académique Université de Tébessa.

[**P.Kumar Mehta Paulo J.M.Monteiro . 2006**] « *Concrete Microstructure, Properties, and Materials Third Edition* » Department of Civil and Environmental Engineering University of California at Berkeley publie par McGraw-Hill p 647.

[**Perrier R et Hamelin P.1996**], “Ouvrages d’art utilisant des matériaux composites”. IREX,(6), 8-32, 88-114.

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

[**R.L. Gorring and S. W. Churchill.1961**] "Thermal conductivity of heterogeneous materials," Chemical Engineering Progress, vol. 57, pp. 53-59.

[**RABEHI Mohamed . 2005**] mémoire de magister, Contribution à la caractérisation de la porosité ouverte du béton d’enrobage : Relation entre la résistance à la compression, la profondeur de carbonatation et l’absorption initiale des bétons. Université Amar Telidji à Laghouat.

[**Rahimi et Hutchinson A .2001**]concrte beams strengthened with externally bonded et FRP, ASCE journal of composite for construction, february 2001, pp44-56.

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

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

[**Roberts T.M and Hadji-kazemi H. 1989**] “A theoretical study of the behaviour of reinforced concrete beams strengthened by externaly bonded steel plates”. Proc. Institution of Civil Engineers, Part 2, 87, 39-55.

[**Roberts T.M. 1989**] “Approximate analysis of shear and normal stress concentration in adhésif layer of plate RC beams”. The Struct Engr, London, 67 (12), 229-233.

[**Rokbi. M.2001**] «*Comportement à la rupture et caractérisation mécanique de composites polyester-fibres de verre*», thèse Magister, M'sila.

[**SIDNEY M, JOHNSON . 1969**] traduit par MICHEL LONDEZ « dégradation, entretien et réparation des ouvrages du génie civil » Edition EYROLLES p. 439 .

[**Sihem Kermiche.2007**] «Analyse expérimentale du comportement mécanique de poutres en béton armé préfissurées renforcées de matériaux composites de type textile polymère en toile de fibre de carbone». Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER Université Badji Mokhtar-Annaba.

[**Smith S.T and Teng J.G.2002**], Smith S.T and Teng J.G a), "FRP-strengthened RC beams, I: review of debonding strength models". Engineering Structures, vol 24, 385-395.

[**TANKEU NDANGA Tatiana Sylviane, 2011**] . mémoire master en ingénierie de l'eau et de l'environnement, pathologie évaluation et réparation de ponts en béton arme, étude de cas : ouvrages sur le tronçon atakpame – kara de la route nationale N°1 AU TOGO , institut international de l'eau et de l'environnement.

[**Thomas Telford . 1997**] Durable Concrete Structures Design Guide Ltd p. 112

[**Vervisch-Fortuné I . 2009**].Sensibilité de la technique d'émission acoustique à la corrosion des armatures dans le béton (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).

[**Vilnary O. 1988**] "The analysis of reinforced concrete beams strengthened by epoxy bonded steel plates". Int. Journal Cement Compo and Light Weight Concrete. 10 (2), 73-78.

[**Wu Z Y.2004**] Wu Z Y., "Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton armé préfissurée et renforcées par matériaux composites sous chargement statique et de fatigue". Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

[**Xue Jun He .2019**] "Interfacial stresses in reinforced concrete cantilever members strengthened with fibre-reinforced polymer laminates". Advances in Structural Engineering, 2019.

[**Yahiaoui S . 2006**] "Etude expérimentale de la durabilité des éléments en béton armé rigidifiés par les matériaux composites "mémoire de magister université de Boumerdes. Structures, 23 (7), 857-871.