



**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 :

BENEDDINE Fethi

BENDINE Zohra

*Sujet du mémoire*

***Analyse mécanique d'une poutre console métallique sous  
différentes charges mécaniques renforcée par matériaux  
composites.***

*Soutenu publiquement le .../06/2022 devant le jury composé de :*

Mr, KRIM Abdellah

Président

Mr, RABAHI Abderezak

Rapporteur

Mr, DJEBLI Benyagoub

Examineur

Mr, KERROUM Nadir

Examineur

2021/2022



# *Remerciements*

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

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

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

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

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

# ***DÉDICACES***



**Je dédie ce modeste travail :**

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

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

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

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

**À mon grand-père Abd madjide rabi yarhmo**

**A Mes très chers frères : Hicham, Abdel Madjid, Amine ,Fethi,  
Oussama ,Lahcen, Hocine, Madani et Islam.**

**A Mes Sœurs : Salsabil ,Fatima ,Karima et Ayouta.**

**A toutes mes accompagnantes sans exception et spécialement**

**Ikram , Djihane et Karima .**

**A tous ceux qui m'ont encouragé à faire mon voyage de succès et  
d'excellence.**

## Sommaire

Liste des tableaux .....	VI
Liste des figures .....	VII
Liste des notations .....	X
Liste des figures .....	IX
Liste des notations .....	XII
Notations : .....	XII
Résumé .....	XIV
Abstract .....	XV
ملخص .....	XVI
Introduction générale .....	XVII

**Chapitre I : Pathologies des structures métalliques**

I.1. Introduction .....	1
I.2. Pathologies et principales causes des désordres affectant les ouvrages .....	1
I.2.1. Dégradation des matériaux .....	1
I.2.2. Erreurs .....	7
I.2.3. Actions anormales .....	9
I.2.4. Ignorance .....	10
I.2.5. Au niveau du projet .....	10
I.2.6. Au niveau du montage .....	11
I.2.7. Erreurs de conception ou d'études .....	11
I.3. Conclusion .....	16

**Chapitre II : Techniques de réhabilitation des structures**

II.1. Introduction .....	18
II.2. Définition des techniques de réhabilitation .....	18
II.2.1. Réhabilitation .....	18
II.2.2. La réparation .....	18

<i>II.2.3. Le renforcement</i> .....	19
<i>II.3. Techniques de réparation et renforcement des structures métalliques</i> .....	20
<i>II.3.1. La peinture</i> .....	20
<i>II.3.2. Le zingage</i> .....	21
<i>II.3.3. Le placage</i> .....	21
<i>II.3.4. Réparation par soudage, boulonnage</i> .....	22
<i>II.3.5. Réparation par rivetage</i> .....	22
<i>I.3.6. La technique de précontrainte additionnelle</i> .....	23
<i>II.3.7. Addition d'éléments structurels complémentaires</i> .....	24
<i>II.4. Structures renforcées par matériaux composites</i> .....	24
<i>II.4.1. Renforcement par collage de plats métalliques</i> .....	25
<i>II.4.2. Renforcement par collage de plats composites</i> .....	25
<i>II.4.3. Renforcement des structures par des polymères renforcés de fibres (FRP)</i> .....	26
<i>II.4.4. Limites et conditions d'utilisation des FRP pour le renforcement :</i> .....	29
<i>II.5. Conclusion</i> .....	29

### **Chapitre III : Généralité sur les matériaux composites**

<i>III.1. Introduction</i> .....	31
<i>III.2 Historique des matériaux composites</i> .....	31
<i>III.3 Qu'est-ce qu'un matériau composite ?</i> .....	32
<i>III.4. Avantage et inconvénients des matériaux composites</i> .....	33
<i>III.4.1. Avantage des matériaux composites</i> .....	33
<i>III.4.2. Inconvénients des matériaux composites</i> .....	33
<i>III.5. Classement d'un matériau composite</i> .....	33
<i>III.6. Les constituants des matériaux composites</i> .....	34
<i>III.6.1. La matrice</i> .....	34
<i>III.6.1.1. Les matrices organiques</i> .....	35

III.6.1.2. Matrices céramiques .....	38
III.6.1.3. Matrice métallique .....	38
III.6.2. Le renfort.....	38
III.6.2.1. Les fibres.....	38
III.6.2.2. Forme du renfort.....	41
III.7. Conclusion .....	43

**Chapitre IV : Comportement des poutres métalliques renforcées par matériaux composites**

IV.1. Introduction.....	46
IV.2. Poutres métalliques renforcées par matériaux composites .....	46
IV.3. Les différents schémas de renforcement d'une poutre métallique en I.....	47
IV.4. Procédure de renforcement des poutres métalliques .....	48
IV.5. Modes de rupture des poutres métalliques renforcées par matériaux composites .....	51
IV.5.1. Rupture due à la traction de la poutre métallique ou du composite.....	51
IV.5.2. Rupture due à la compression de la poutre métallique.....	52
IV.5.3. Rupture due au décollement de la plaque composite de renforcement.....	52
IV.5.4. Rupture due au cisaillement aux extrémités de la poutre métallique en I.....	53
IV.6. Conclusion .....	53

**Chapitre V : Analyse mécanique des contraintes d'interface d'une poutre console métalliques renforcée par matériaux composites sous différentes charges mécaniques**

V.1. Introduction.....	55
V.2. Analyse théorique .....	55
V.2.1. Distribution des contraintes de cisaillement dans l'interface composite– Acier.....	57
V.2.2. La distribution des contraintes normales dans l'interface composite – Acier .....	60
V.3. Validation du modèle .....	62
V.4. Etude paramétrique .....	64
V.4.1. Effet de la longueur (a).....	64

<i>V.4.2. Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive <math>t_a</math>.....</i>	<i>65</i>
<i>V.4.3. Effet de l'épaisseur de la plaque <math>t_2</math> .....</i>	<i>67</i>
<i>V.4.4. Effet de coefficient de poisson de l'adhésive <math>\nu_a</math>.....</i>	<i>69</i>
<i>V.4.5. Effet de la rigidité de la colle d'adhésive <math>E_a</math>.....</i>	<i>70</i>
<i>V.4.6. Effet de la fraction volumique des fibres <math>V_f</math>.....</i>	<i>72</i>
<i>V.5. Conclusion.....</i>	<i>73</i>
<i>Conclusion Générale .....</i>	<i>71</i>
<i>Référence bibliographique</i>	

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1:</b> Typologie des développements de la corrosion.....	3
<b>Tableau.III.1 :</b> les différents types de composites. ....	32
<b>Tableau III.2:</b> Propriétés des Résines thermodurcissables .....	35
<b>Tableau.III.3 :</b> Comparaison entre les deux types de résines.....	37
<b>Tableau III.4:</b> Propriétés des fibres .....	39
<b>Tableau III.5 :</b> Avantages et handicaps des différentes fibres.....	41
<b>Tableau IV.1 :</b> Différents schémas de renforcement d'une poutre métallique en I .....	48
<b>Tableau V.1 :</b> Propriétés géométriques et mécaniques de la poutre étudié.....	63
<b>Tableau V.2 :</b> Propriétés géométriques et mécaniques de matériaux utilisés .....	63
<b>Tableau V.3 :</b> L'influence de la longueur ( $a$ ) sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par différents types de matériaux composites .....	64
<b>Tableau V.4 :</b> Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive $t_a$ sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par différents types de matériaux composites.....	66
<b>Tableau V.5 :</b> L'influence de l'épaisseur de la plaque composite $t_2$ sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par différents types de matériaux composites.....	67
<b>Tableau V.6 :</b> L'influence de coefficient de poisson de l'adhésive $\nu_a$ sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par différents types de composites .....	69
<b>Tableau V.7 :</b> L'influence de la rigidité de la colle d'adhésive $E_a$ sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par différents types de composites .....	70
<b>Tableau V.8:</b> Effet de la fraction volumique des fibres $V_f$ sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par différents types de composites .....	72

## Liste des figures

<i>Figure I.1 : Corrosion de poteaux métallique</i> .....	2
<i>Figure I.2 : Potentiel standard de quelques couples oxyde-réducteurs qui nous intéressent dans cette étude</i> .....	3
<i>Figure I.3 : Localisation possible d'une fissure provoquée par fatigue dans un pont-route</i>	5
<i>Figure I.4 : Rupture plane à fond de filet sur un élément en barre</i> .....	6
<i>Figure I.6: La limite d'élasticité en fonction de l'épaisseur de l'acier</i> .....	8
<i>Tableau I.2: classe de qualité des vis</i> .....	9
<i>Figure I.7 : Poutre à treillis</i> .....	12
<i>Figure I.8: Flambement de goussets</i> .....	12
<i>Figure I.9: Phénomène de flambement</i> .....	13
<i>Figure I.10 : Phénomène de voilement</i> .....	14
<i>Figure I.11 : Phénomène de voilement total de l'âme</i> .....	14
<i>Figure I.12: Voilement local de la membrure de l'âme supérieure</i> .....	14
<i>Figure I.13: Phénomène de déversement des poutres</i> .....	15
<i>Figure I.14 : Fissuration à chaud</i> .....	15
<i>Figure II.1 : Exemple de la mise en place de plaques de renfort d'un élément de cornières</i> .....	21
<i>Figure II.2 : Détails de mise en place de renforts de poutre à larges ailes</i> .....	21
<i>Figure II.3 : Soudage à l'arc avec fil fourré</i> .....	22
<i>Figure II.4 : Rivet constitution d'un assemblage.</i> .....	22
<i>Figure II.5 : Pose d'un rivet à tête ronde et gougeage de la tête de rivet.</i> .....	23
<i>Figure II.6: Principe de renforcement par précontrainte additionnelle</i> .....	23
<i>Figure II.7 : Renforcement d'un portique par une triangulation excentrée.</i> .....	24
<i>Figure II.8 : Renforcement d'un plancher en portique plan par triangulation.</i> .....	24
<i>Figure II.9 : Renforcement par plats métalliques</i> .....	25

<b>Figure. II.10 :</b> Tôles colées ; (a) difficulté de manutention ; (b) Renforcement du viaduc de Terrenoire par tôles collées perforées -Brevet Freyssinet .....	25
<b>Figure II.11:</b> Différentes méthodes de renforcement par le collage de plaques en composites .....	26
<b>Figure.II.12 :</b> Procède Par Collage De Plaques.....	26
<b>Figure II.13 :</b> Renforcements des structures par des plaques en FRP.....	28
<b>Figure II.14 :</b> Comparaison du comportement mécanique de la poutre renforcée et celle non renforcée .....	29
<b>Figure.III.1 :</b> constituants d'un matériau composite .....	32
<b>Figure.III.2 :</b> Classification des matériaux composites .....	34
<b>Figure III.3 :</b> Type de matrice.....	35
<b>Figure.III.4 :</b> Organigramme des différentes familles de fibres .....	38
<b>Figure III.5 :</b> Histogramme des propriétés en traction des fibres .....	39
<b>Figure III.6 :</b> Fibre de verre. ....	40
<b>Figure III.7 :</b> Fibre de carbone. ....	40
<b>Figure III.8 :</b> Fibre d'aramide. ....	40
<b>Figure IV.1 :</b> Comparaison du comportement mécanique de la poutre renforcée et avec celle non renforcée .....	47
<b>Figure IV.2 :</b> Exemple de procédé des travaux de renforcement du Pont métallique "Pottawattamie" en état d'Iowa avec des plaques en CFRP.....	50
<b>Figure IV.3 :</b> Rupture en tension de la poutre en I.....	51
<b>Figure IV.4 :</b> Rupture en tension de la plaque composite .....	52
<b>Figure IV.5 :</b> Instabilité locale par rupture en compression de la poutre en I.....	52
<b>Figure IV.6 :</b> décollement de la plaque .....	53
<b>Figure IV.7:</b> Rupture en cisaillement .....	53
<b>Figure V.2 :</b> Un segment différentiel de la poutre métallique renforcée par collage de composite. ....	56
<b>Figure V.3:</b> La comparaison entre la présente méthode et le modèle de RABAHI A.....	63

**Figure V.4:** L'influence de la longueur  $a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par différents types de matériaux composites : (a) charge répartie, (b) charge concentrée à l'extrémité. ....65

**Figure V.5:** Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive  $t_a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par différents types de matériaux composites : (a) charge répartie, (b) charge concentrée à l'extrémité. ....67

**Figure V.6:** Effet de l'épaisseur de la plaque  $t_2$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par différents types de matériaux composites : (a) charge répartie, (b) charge concentrée à l'extrémité. ....68

**Figure V.7:** Effet de coefficient de poisson de l'adhésive  $\nu_a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par différents types de matériaux composites : (a) charge répartie, (b) charge concentrée à l'extrémité. ....70

**Figure V.8 :** Effet de la rigidité de la colle  $E_a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par composites : (a) charge répartie, (b) charge concentrée. ..71

**Figure V.9 :** Effet de la fraction volumique  $V_f$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par composites : (a) charge répartie, (b) charge concentrée. ..73

**Liste des notations**

**FRP** : Fiber Reinforced Polymers « polymères renforcés de fibres ».

**GFRP** : Glass Fiber Reinforced Polymer « polymères renforcés de fibres de verre ».

**CFRP** : Carbon Fiber Reinforced Polymer « polymères renforcés de fibres de carbone ».

**HR** : Haute Résistance

**HM** : Haut Module

*Notations :*

$E_2$  : Module de Young de composites (loi de mélange).

$E_m$  : Module de Young des matrices.

$E_f$  : Module de Young des fibres.

$V_f$  : Fraction volumique des fibres.

$V_m$  : Fraction volumique des matrices.

$t_a$  : l'épaisseur de la couche d'adhésive.

$t_2$  : l'épaisseur de la plaque de renforcement.

$E_a$  : la rigidité de la colle d'adhésive.

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

$b$  : Distance entre le point d'application de la force concentrée et le bord de la plaque.

$b_0$  : Epaisseur de l'âme du profilé en I.

$t_0$  : Epaisseur de la semelle du profilé en I.

$b_1$  : Largeur de la poutre métallique.

$b_2$  : Largeur de la plaque composite.

$t_1$  : Hauteur de la poutre métallique.

$\varepsilon_1(x)$  et  $\varepsilon_2(x)$ : Déformations de la poutre métallique et de la plaque composite

$u_1(x)$  et  $u_2(x)$  : Déplacements longitudinaux à la face inférieure de l'acier 1 et à la face supérieure de composite 2.

$y_1$  et  $y_2$  : Distances entre la face inférieure de l'adhérent 1 et la face supérieure de l'adhérent 2 et leurs centres de gravité respectifs.

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

$\sigma_n(x)$  : Contrainte normale.

$M_1(x)$  et  $M_2(x)$  : Moments fléchissant de la poutre en acier 1 et la plaque composite 2.

$E_1$ ,  $E_2$  et  $E_a$  : Modules d'élasticité longitudinaux de l'acier 1, de composite 2 et de l'adhésif.

$I_1$  et  $I_2$  : Moments d'inertie de la poutre métallique 1 et du composite 2.

$A_1$  et  $A_2$  : Sections transversales de la poutre métallique 1 et du composite 2.

$N_1(x)$  et  $N_2(x)$  : Forces axiales de l'acier 1 et de la plaque composite 2.

$V_1(x)$  et  $V_2(x)$  : Efforts tranchants appliqués dans la poutre 1 et dans le composite 2.

$x$  : Distance comptée à partir du bord de la plaque composite ou de la plaque en acier.

$\xi$  : Coefficient qui tient compte de la forme géométrique de la section de la poutre étudiée.

$K_s$  : Rigidité au cisaillement de la couche d'adhésif.

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

$R$  : Coefficient de proportionnalité.

$M_T(x)$  : Moment de la poutre.

$G_1$  et  $G_2$  : Modules de cisaillement de la poutre métallique 1 et de la plaque composite 2.

$\nu_a$  : Coefficient de poisson de l'adhésif.

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

$w_1(x)$  et  $w_2(x)$  : Déplacements verticaux de la poutre métallique 1 et du composite 2.

$L$  : Longueur de la poutre métallique.

$L_p$  : Longueur de la plaque de renforcement composite.

$q$  : Charge uniformément répartie.

$P$  : Charge concentrée.

### *Résumé*

L'utilisation des matériaux composites dans la réparation et le renforcement des structures métalliques, soumises à des dégradations et à des contraintes environnementales très sévères est devenue une solution prometteuse et efficace. Cette technique consiste à coller une plaque composite sur ces structures afin d'augmenter sa rigidité et sa résistance vis-à-vis de la flexion et/ou de l'effort tranchant. Cependant, le mode de rupture le plus important de ces structures renforcées est le décollement de la plaque composite en raison des contraintes d'interfaces élevées à proximité du bord de la plaque. Ainsi, afin de prévenir d'éventuels risques pouvant remettre en cause la stabilité globale de la structure, il est nécessaire de prévoir de telles contraintes.

Ce travail, nous présentons l'étude du comportement d'une poutre console métallique sous chargement mécanique renforcée par différents types de matériaux composites. Une méthode analytique basée sur le principe de compatibilité des déformations permettant le calcul des contraintes à l'interface composite – acier à l'extrémité de la plaque de renforcement en prenant en considération les déformations 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 :** poutre métallique, renforcement, réparation, matériau composite, plaque composite, contrainte d'interface.

*Abstract*

The use of composite materials in the repair and Reinforcement of metal structures, subject to degradation and very severe environmental constraints has become a promising and effective solution. This technique consists of bonding a composite plate to these structures in order to increase its rigidity and its resistance to bending and/or shear force. However, the most important failure mode of these reinforced structures is the debonding of the composite plate due to the high interface stresses near the edge of the plate. Thus, in order to prevent possible risks that could jeopardize the overall stability of the structure, it is necessary to provide for such constraints.

In this work, we present the study of the behavior of a metal cantilever beam under mechanical loading reinforced by different types of composite materials. An analytical method based on the principle of deformation compatibility allowing the calculation of the stresses at the composite interface - steel at the end of the reinforcement plate by taking into account the shear deformation in the two adherents, the results of our present model were validated by comparison with interface stress results from the literature. A parametric study was carried out in order to highlight the impact of different parameters on the interface constraints.

**Keywords:** Steel beam, Repair, Reinforcement, Composite material, composite plate, Interface stresses,

## ملخص

استخدام المواد المركبة في اصلاح وتعزيز الهياكل المعدنية المعرضة لتدهور ولظواهر البيئية الشديدة للغاية أصبح حلا واعدا وفعلا. تتمثل هذه التقنية بربط صفيحة مركبة بهذه الهياكل لزيادة صلابتها ومقاومتها لقوة الانحناء او القص. ومع ذلك فإن وضع اهم فشل في هذه الهياكل المعززة هو انفصال اللوح المركب بسبب الاجهادات الوجهية العالية بالقرب من حافة اللوحة. وبالتالي من اجل منع المخاطر المحتملة التي يمكن ان تعرض استقرار الهيكل العام للخطر، من الضروري توفير مثل هذه الاجهادات.

في هذا العمل، نقدم سلوك رافدة معدنية تحت التحميل الميكانيكي المعزز بأنواع مختلفة من المواد المركبة. طريقة تحليلية قائمة على مبدأ توافق التشوهات مما يسمح بحساب الاجهادات في الواجهة المركبة \_ الصلب في نهاية لوحة التسليح مع الأخذ في الاعتبار تشوهات القص في الملتصقين، وكانت نتائج نموذجنا الحالي تم التحقق من صحتها من خلال المقارنة مع نتائج الاجهادات الوجهية من الاديبيات. تم إجراء دراسة اعدادية من اجل إبراز تأثير العوامل المختلفة على الاجهادات.

**الكلمات المفتاحية:** رافدة معدنية، تعزيز، اصلاح، مواد مركبة، لوحة مركبة، الاجهادات الوجهية.

## *Introduction générale*

Les ouvrages métalliques sont souvent exposés à des conditions environnementales difficiles (séisme, choc, ..... ) ou amenés à recevoir des surcharges très importantes auxquelles ils doivent résister afin de remplir de façon satisfaisante pendant leur période d'utilisation, toutes les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus. Lorsqu'ils ne peuvent pas résister à ces conditions sévères, des désordres vont apparaître.

Les chercheurs virent vers la proposition d'utilisation des matériaux nouveaux avec de nouvelles techniques de réalisation qui assurent le retour de rigidité et de résistance à l'ouvrage. Plusieurs méthodes de renforcement des structures métalliques ont été proposées dans le domaine de restauration des structures existantes.

Le rôle des matériaux composites dans le renforcement des structures est important. De nombreux travaux de recherche et des réalisations pratiques ont démontré l'efficacité de la technique de réhabilitation des bâtiments et des ouvrages d'art par les composites. Au début des plaques d'acier étaient utilisées comme éléments de renforcement, mais elles ont été remplacées progressivement par les matériaux composites. L'utilisation de plus en plus fréquente des matériaux composites s'explique d'une part par leurs propriétés mécaniques élevées et d'autre part, par le progrès dans les procédés de leur fabrication durant ces dernières décennies.

L'utilisation des matériaux polymères renforcés de fibres (FRP) pour la réparation et le renforcement est une solution courante et largement acceptée dans le domaine de la réparation des structures en génie civil. Les codes de conception ont été adaptés pour prendre en compte la présence d'un renfort. Les avantages pour les FRP relativement aux autres matériaux de réparation classiques sont un rapport résistance-poids très élevé, une insensibilité à la corrosion et surtout une facilité de mise en œuvre.

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

L'objectif de notre travail est le développement d'une solution analytique directe qui détermine les contraintes d'interface au niveau de la couche d'adhésif d'une poutre console métallique renforcée par matériaux composite.

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

□ Le premier chapitre : décrira, à travers une étude bibliographique les pathologies des structures métalliques. Puisque l'élément étudié dans notre travail est une poutre métallique

□ Le deuxième chapitre : Défini les différentes technologies de réparation et de renforcement couramment utilisées dont la technique de renforcement par matériaux composites.

□ Le troisième chapitre : Sera consacré à une revue d'ensemble sur les matériaux composites et leurs différentes propriétés.

□ Le quatrième chapitre : est consacré des comportements des poutres métalliques renforcées par matériaux composites, soumises à des chargements mécaniques, avec en particulier les différents schémas de collage de matériaux composites sur une poutre métallique en I travaillant en flexion et les mécanismes de rupture d'une poutre métallique renforcée par le collage d'une plaque en composite.

□ Le cinquième chapitre : sera consacré sur les résultats obtenus et les études paramétriques qui influent sur le comportement d'une poutre console métallique renforcée par différents types des composites.

Enfin, nous concluons notre travail par conclusion générale basée sur les résultats obtenus par notre méthode, et soulignons son efficacité dans la conception et les calculs liés aux structures composites renforcées. Nous exprimerons quelques points de vue sur les travaux présentés ici.

# CHAPITRE I

## *Pathologies des structures métalliques*



## **I.1. Introduction**

Les constructions évoluent, vieillissent et subissent des agressions diverses qui affectent inégalement les matériaux qui la constituent, il est alors nécessaire d'apprécier avec justesse la nature, l'étendue et le degré de gravité des pathologies, avant de recommander les mesures préventives ou curatives les plus appropriées.

Un diagnostic précis des désordres et une recherche des causes des dégradations doivent être établis pour aboutir à des préconisations de solutions de réparation ou de prévention réalistes et durables.

Dans ce chapitre nous présenterons les pathologies et principales causes des désordres.

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

Les ouvrages de génie civil sont dimensionnés pour une durée de vie moyenne. Toutefois, plusieurs types de désordres viennent réduire cette durée de vie prévisionnelle. Il existe un grand nombre de pathologies dans les ouvrages métalliques dont les origines peuvent être mécaniques, physico-chimiques, accidentelles ou encore liées aux erreurs de calcul, de conception, de réalisation ou de fabrication. Dans le cas des ponts métalliques, un grand nombre d'ouvrages présente un état de dégradation avancée causé par une exposition prolongée à un environnement agressif, ainsi que par une augmentation continue des charges d'utilisation qui sont aujourd'hui jusqu'à 40% plus élevées que les charges du dimensionnement [47]. De plus, les derniers tremblements de terre en Algérie (Mascara en 1994, Ain T'émouchent en 1997 et Boumerdes en 2003) ont démontré la vulnérabilité des ouvrages construits avant 1980 [5]. Par ailleurs les normes et techniques qui ont été utilisées à leur conception ont généralement été modifiées ou améliorées depuis la date de leur construction. De nombreux cas pathologiques relevés sur des ouvrages métalliques sont attribués à la présence des causes possibles et qui sont les suivantes :

### ***1.2.1. Dégradation des matériaux***

Les propriétés physiques et, plus particulièrement, le comportement mécanique des aciers sont susceptibles de se dégrader en fonction des conditions d'environnement définies par la localisation géographique de l'ouvrage. Les principales causes de vieillissement sont liées aux phénomènes suivants [46].

### *1.2.1.1. La Corrosion*

Les désordres observés principalement occasionnés par la corrosion qui se manifeste différemment sur les parties métalliques en fonction des zones d'exposition (environnement), de la nuance du matériau utilisé ou même du type de liaison entre les éléments de la structure, en effet, les métaux sont généralement peu stables à l'état se combinent à d'autres éléments chimiques pour former des sulfures, des oxydes ou des carbonates. La corrosion est la conséquence de cette évolution vers des sels métalliques. Cette dégradation peut être facilement décelée, les symptômes sont des surfaces piquées, oxydées, laissant apparaître en générale des plaques et écailles d'oxyde facilement détachables d'aspect rouge brun, typique [53].



*Figure I.1 : Corrosion de poteaux métallique [1]*

#### ✓ **La corrosion de l'acier :**

La corrosion de l'acier est la cause principale de la détérioration des infrastructures de génie civil et constitue un défi important pour l'industrie de la construction à travers le monde. L'ACC (l'Association Canadienne de la Construction) évalue les pertes globales concernant les infrastructures à environ 900 milliards de dollars [14]. On estime que la corrosion détruit un quart de la production annuelle d'acier soit 5 tonnes par seconde [36].

Le fer métallique Fe<sup>0</sup> (pour degré d'oxydation zéro) possède deux degrés d'oxydation (**Figure I.2**) :

- Fe II, avec la formation d'ions ferreux Fe<sup>2+</sup>, à partir du Fe<sup>0</sup>
- Fe III, avec la formation d'ions ferriques Fe<sup>3+</sup> à partir du Fe<sup>2+</sup>

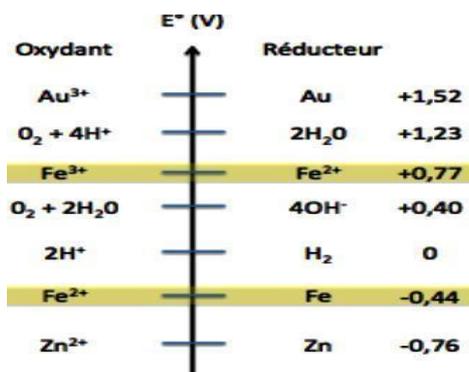


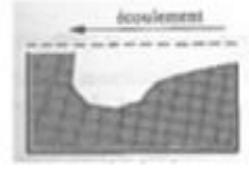
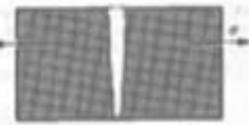
Figure I.2 : Potentiel standard de quelques couples oxyde-réducteurs qui nous intéressent dans cette étude [45].

✓ Développement du mécanisme

Le phénomène de la corrosion est connu depuis bien longtemps, et celui-ci n'est pas soumis à un seul mécanisme simple. On peut en effet établir une typologie des développements de la corrosion (Tableau I. 1) [45].

Tableau I.1: Typologie des développements de la corrosion [45].

Corrosion	Schéma (LAN97)	Origine
Uniforme		La corrosion se propage uniformément sur toute la surface en contact avec l'environnement.
Galvanique		Deux éléments aux propriétés électrochimiques différentes sont en contact. Seul l'un des deux est corrodé, l'autre ne l'est pas du tout
Caverneuse		La corrosion s'effectue de façon privilégiée au niveau d'une enclave, d'une irrégularité ou d'un trou dans le matériau. Cela est dû à la différence de potentiel électrochimique de l'environnement entre la surface pleine et la surface de l'irrégularité. Par exemple dans le cas de la corrosion de l'acier, c'est la différence de concentration en oxygène à la surface et dans la caverne qui est à l'origine d'une différence de potentiel électrochimique, et donc de cette corrosion différentielle
Par piqures		La corrosion par piqure est issue du même phénomène que la corrosion caverneuse. La piqure est initiée à partir d'un défaut dans la surface initialement lisse.
Inter granulaire		La corrosion se développe entre deux grains constituant le matériau. Par exemple entre deux grains de cristal métallique d'orientation différente

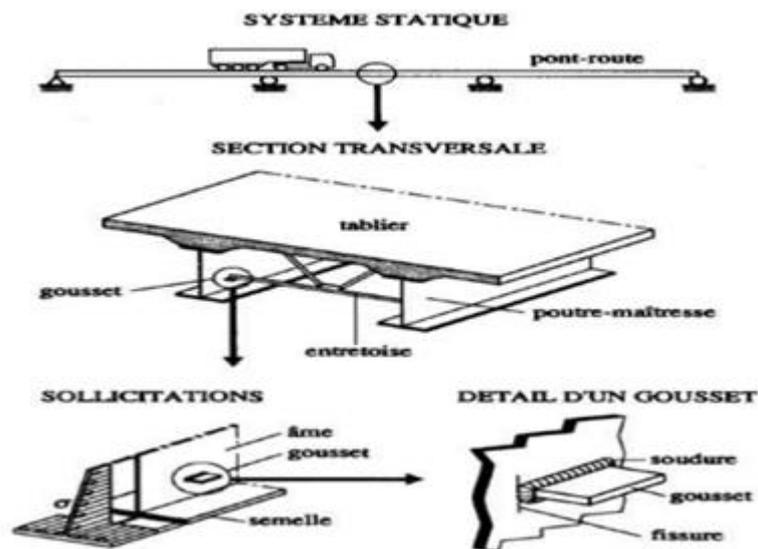
<b>Sélective</b>		La corrosion ne s'effectue pas de façon uniforme , même si toute la surface du matériau est attaquée par pouvons observer le corrosion , TOUS développement simultanée de piqûres.
<b>Corrosion érosion</b>		Cette corrosion se développe lorsque le matériau est exposé à un écoulement , continu ou non , qui va favoriser son développement à certains endroits de la surface.
<b>Sous contrainte</b>		Cette corrosion se développe dans un matériau contraint , tels que par exemple un élément métallique porteur dans une structure du génie civil.

### ✓ **Autres formes de corrosion**

D'autres formes de corrosion existent dont, la corrosion par influence de courants électrique vagabonds sur des pièces métalliques situées à proximité de tramways ou de chemin de fer alimentés en courants continu. La corrosion des armatures dans les structures en béton armé tels que les murs de soutènement ou les digues, notamment si ces derniers sont réalisés sur des berges d'oueds hautement pollués, peut également être induite par la dégradation microbienne, due à des bactéries [75].

#### ***1.2.1.2. La Fatigue***

La fatigue est défini comme la modification des propriétés des matériaux sous l'action de charges dans le temps ou de cycles d'effort, dont la répétition peut conduire à la rupture par fissuration de la pièce ou de la structure constituée de ce matériau et qui peut se produire sous des contraintes inférieures à la résistance du matériau en statique : c'est la rupture en fatigue, cette rupture vient principalement de fissures microscopiques qui apparaissent dans le matériau dès les premiers cycles de chargement et qui progressent doucement à chaque fois que l'on sollicite le matériau, les symptômes en sont de petites stries perpendiculaires à la direction des contraintes et représentant un grave danger, du fait que les fractures qui en résultent risquent d'être très difficiles à déceler. [63]. L'Eurocode 3 la définit comme étant endommagement d'une partie de la structure, dû à la propagation lente d'une fissure provoquée par des fluctuations répétées de contrainte. La (figure I.3) montre schématiquement l'exemple d'un pont-route mixte soumis à des charges de trafic.



*Figure I.3 : Localisation possible d'une fissure provoquée par fatigue dans un pont-route [2].*

### **1.2.1.3. La rupture**

La ruine de l'ouvrage pouvant provenir : soit d'un accroissement des valeurs maximales des efforts à transmettre (effets dynamiques proprement dits), soit de phénomènes de fatigue, mettant en jeu simultanément les valeurs maximales des efforts et le nombre des sollicitations alternées (changements du signe des efforts) ou simplement modulées (variations alternatives d'efforts restant de même signe). Ces derniers deviennent dangereux dans les constructions lorsque le métal est trop sensible à la rupture fragile. La rupture fragile risque d'apparaître, même en l'absence de sollicitations de fatigue, par concentration de contraintes qui dépassent souvent la limite d'élasticité, lorsque la capacité d'adaptation plastique n'est pas suffisante. La résistance d'un assemblage dépendra donc toujours au-delà d'un calcul de résistance généralement sommaire correspondant assez bien aux sollicitations statiques, de la conception de l'assemblage et des conditions de fabrication, combinées avec des qualités du métal dépendant de sa composition chimique et de son élaboration. De nombreuses études ont porté sur la rupture de structures métalliques. Certaines se sont focalisées sur son aspect mécanique, tel que la propagation de fissures, alors que d'autres insistent sur le lien du phénomène avec la mécanique des fluides. Peu de modèles combinent les deux approches, et la plupart des études qui les mettent en jeu sont adaptées aux conduites, en particulier les gazoducs [26] [20].



*Figure I.4 : Rupture plane à fond de filet sur un élément en barre [41]*

#### ***1.2.1.4. La fragilité***

La ductilité et, a contrario, la fragilité d'un matériau dépendent de nombreux paramètres, dont notamment le mode d'élaboration, la température et la vitesse de déformation. Concernant la température, la plupart des matériaux cristallins sont fragiles à basse température et deviennent ductiles au-dessus d'une certaine température. Cette température est appelée la température de transition fragile-ductile [41].



*Figure I.5 : Effondrement du pont de Sully-sur-Loire en janvier 1985 [41].*

### ***1.2.2. Erreurs***

Les erreurs qui peuvent provoquer des sinistres dans les structures, sont faites par ceux qui conçoivent, construisent ou utilisent l'ouvrage, ou ceux qui le démolissent ou font des excavations dans le voisinage immédiat. Il importe que ces personnes possèdent les meilleures informations disponibles et l'expérience pour s'en servir. Allant d'une simple erreur de dessin, à une erreur de conception ou parfois des lacunes dans les règles de calculs, ces erreurs peuvent provoquer de graves sinistres comme le cas du pont Tacoma où l'effondrement est dû à la non prise en considération des efforts dynamique dans les calculs. [53]

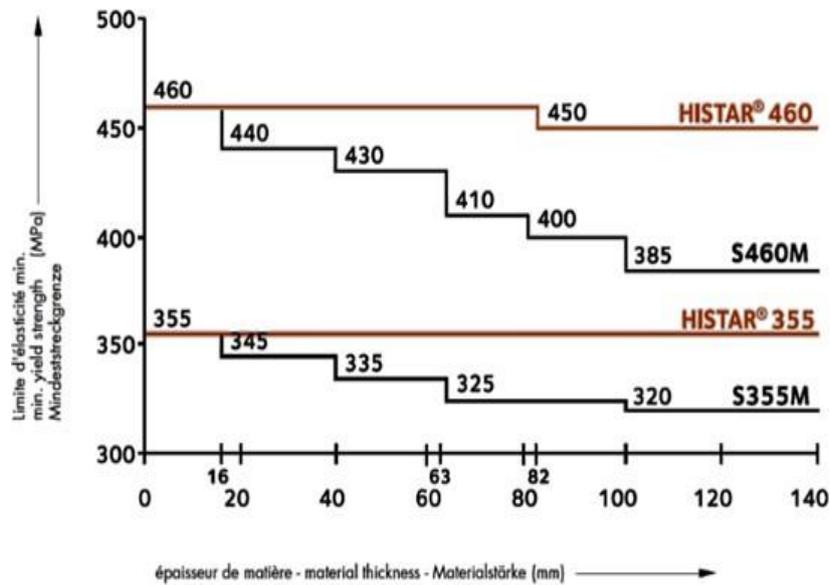
#### ***1.2.2.1. Au bureau d'études***

Ces erreurs sont les erreurs les plus fréquentes. Les erreurs que l'on trouve dans les coupes ou les chiffres sont mal présenté et en ligne les cotes son mal implanté. Et le remarque ces erreurs lors de l'exécution en raison de l'incompatibilité qu'elles entraînent. Ce sont, par exemple, des erreurs d'opération, d'écriture de formules, etc.

Par exemple, sur les valeurs des caractéristiques des matériaux, les hypothèses de site, de charges d'utilisation. Les conséquences des deux derniers types sont souvent plus graves que les erreurs de dessin, car elles peuvent donner l'illusion d'une sécurité qui n'est pas atteinte en réalité (contraintes minimisées...). [1].

#### ***1.2.2.2. À l'atelier***

Le choix de qualité ou de nuance des aciers ne correspondent pas à des aspects physiques différents **Figure I.6**. Il peut donc se produire des confusions involontaires dans les matériaux utilisés. S'ils ne font pas l'objet d'un marquage ou si les consignes de classement ne sont pas rigoureusement appliquées dans les parcs à matières ou les magasins. Ces erreurs risquent alors de conduire à des diminutions importantes des coefficients de sécurité et par conséquent d'aboutir à des sinistres graves comme elle montre la **figure I.6** [45].



*Figure I.6: La limite d'élasticité en fonction de l'épaisseur de l'acier [45].*

### ***1.2.2.3. Erreur d'échantillonnage***

Ces erreurs sont relativement rares. Elles se produisent principalement lors de l'utilisation de profils creux présentant des variations d'épaisseur pour les mêmes dimensions extérieures. Dans ces cas, Les diminutions des coefficients de sécurité sont plus faibles que dans le cas précédent en raison des faibles variations des caractéristiques dimensionnelles. [74]

### ***1.2.2.4. Au chantier***

L'étude doit prévoir, dans ce cas, des incompatibilités de montage afin d'éliminer ce genre d'erreurs. Ce genre d'erreurs devrait, comme dans le cas précédent, être éliminé par des incompatibilités de montage. Physiquement, un boulon de diamètre 20 mm classe 4.6 et un boulon de diamètre 20 mm classe 6.8 se ressemblent à la différence du marquage de la tête de vis la confusion entre deux classes, pour un même diamètre, peut être dramatique si elle est dans le sens de la diminution de résistance. Cette erreur possible peut être éliminée au niveau des études en ne prévoyant que des diamètres différents par classes utilisées **Tableau I.2** [74].

**Tableau I.2: classe de qualité des vis [45].**

<b>Marquage des têtes</b>	<b>3.6</b>	<b>4.6</b>	<b>4.8</b>	<b>5.6</b>	<b>5.8</b>	<b>6.8</b>	<b>8.8</b>	<b>9.8</b>	<b>10.9</b>	<b>12.9</b>
<b>Classes de résistance</b>	3.6	4.6	3.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9
<b>Limite élastique Re (MPa)</b>	180	240	320	300	400	480	640	720	900	1080
<b>Limite à la rupture Rf (MPa)</b>	330	400	420	500	520	600	800	900	1040	1220
<b>A %</b>	25	22	14	20	10	8	12	10	9	8

**I.2.2.5. Causes accidentelles**

On peut ranger dans cette catégorie les actions imprévisibles, donc par définition non prévues, pendant la durée de vie de la construction [74].

**I.2.2.6. Actions excessives de type normal**

Il s'agit ici d'actions prévues dans l'utilisation de la construction, mais dont l'amplitude dépasse les valeurs pour lesquelles elle a été conçue. Ce sont par exemple :

- Les vitesses de vent dépassant celles du vent exceptionnel prévu par les Règles Neige et Vent.
- Les charges dont l'intensité dépasse la valeur en service normal ;
- Les actions de chocs ; etc. [74].

**I.2.3. Actions anormales**

Le principe même de ces actions n'est pas pris en compte dans la détermination des éléments de la construction puisqu'elles lui imposent des fonctions pour lesquelles elle n'a jamais été prévue. C'est le cas par exemple :

- Des explosions (gaz, bombes, etc) ;
- Des chocs anormaux ;
- D'un incendie (si la tenue au feu n'est pas prévue) ;
- Des inondations ;
- D'un séisme (si la protection antisismique n'est pas prévue) ;
- Des éruptions volcaniques ;
- Des dégâts miniers, etc [74].

#### ***1.2.4. Ignorance***

Le défaut de connaissance total ou partiel reste la cause la plus fréquente des désordres. La méconnaissance des effets des actions sur les structures entraîne des conséquences qui peuvent être graves sur leur tenue [74].

#### ***1.2.5. Au niveau du projet***

Les erreurs dues à l'ignorance au niveau du projet ont des conséquences d'importance variable qui peuvent aller de la simple déformation imprévue au sinistre grave. On peut les classer sous les rubriques suivantes [74].

##### ***1.2.5.1. Absence ou insuffisance du cahier des charges***

Tout projet devrait être défini par un cahier des charges techniques spécifiant toutes les exigences de chargement, de déformation et d'exécution. Pour les projets relatifs à des constructions courantes, ces cahiers des charges se limitent, en général, à une énumération de règlements à appliquer. Ils sont même parfois inexistants. Il importe au projeteur, avant toute étude, de se faire spécifier, par écrit, l'ensemble des hypothèses à retenir. [74].

##### ***1.2.5.2. Méconnaissance des règlements***

Les règles déterminant l'action des charges climatiques (RNV 66 et RNV 99) définissent des domaines d'application qu'il y a lieu d'observer sous peine d'erreurs sur le chargement de la structure [74].

##### ***1.2.5.3. Méconnaissance des outils informatiques***

Un logiciel de calcul est un outil d'utilisation souvent délicate. Il faut apprendre à le connaître et à l'utiliser. Les résultats obtenus doivent absolument être contrôlés par des méthodes de comparaison globale. Les limites d'utilisation doivent être respectées. Une erreur dans un jeu de données peut entacher les résultats et avoir de graves conséquences. La modification éventuelle d'un logiciel doit être sévèrement contrôlée et testée [74].

##### ***1.2.5.4. Erreurs sur les actions***

Elles sont dues à une interprétation erronée des effets de celles-ci, à une prise en compte d'hypothèses, de charges et de leur mode d'action ne correspondant pas à la réalité. On peut rattacher à ce type d'erreur l'oubli de prise en compte de modifications intervenues au cours de l'étude [74].

### ***1.2.5.5. Au niveau de l'exécution***

Les causes de désordres, à ce point de vue, peuvent se ramener à deux types :

- ✓ L'existence de vices cachés dans les matériaux ;
- ✓ Les conséquences imprévues de la mise en œuvre des matériaux, par exemple le chauffage en cours de soudage qui modifie la texture, donc les caractéristiques de l'acier, l'effet d'entaille de certains outils qui réduit la résistance des pièces, etc [74].

### ***1.2.6. Au niveau du montage***

#### ***1.2.6.1. Manque de coordination entre les intervenants***

Cette cause de désordres est fréquente, c'est le cas en particulier du manque de liaison entre le charpentier et le maçon qui a exécuté les soubassements. Le premier, arguant de son incompetence, rejette sur le second la responsabilité de l'implantation des appuis ; le second profite de son ignorance pour déclinier toute responsabilité sur les erreurs d'implantation [74].

Avant d'accepter de prendre en charge un chantier, le charpentier doit donc vérifier par lui-même l'implantation des appuis ou ancrages mis en place par le maçon. Cette réception accomplie, la responsabilité du positionnement passe du maçon au charpentier.

#### ***1.2.6.2. Méconnaissance de la mise en œuvre***

En principe, la mise en œuvre ne devrait pas être la source de désordres, le personnel d'encadrement du chantier devant posséder la compétence requise. Pourtant la négligence est à l'origine de bien des sinistres, par exemple de l'inobservation des consignes propres à un matériau à l'impossibilité d'exécuter des opérations dans certaines conditions météorologiques (soudage), etc. [74].

### ***1.2.7. Erreurs de conception ou d'études***

#### ***1.2.7.1. Poutres à treillis***

##### ***✓ Absence de triangulation***

Les calculs théoriques peuvent conduire à définir un effort tranchant nul dans les panneaux de poutre à treillis **Figure I.7** La suppression de la triangulation dans ces panneaux crée un risque grave si un effort parasite secondaire apparaît ou si le chargement n'est pas parfaitement symétrique [74].

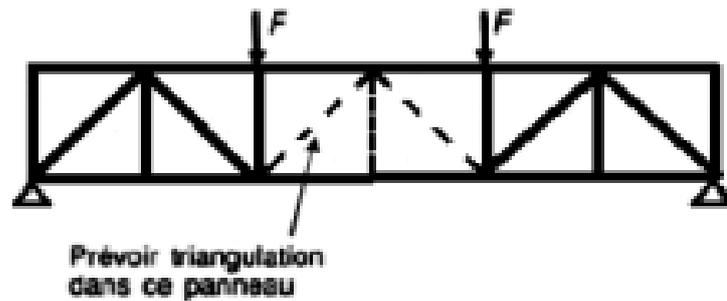


Figure I.7 : Poutre à treillis [74].

✓ **Flambement de barres d'attachée**

Le flambement des barres comprimées des constructions à treillis doit être étudié avec le plus grand soin aussi bien dans le plan de la poutre que dans le plan perpendiculaire. Les réductions de longueur de flambement pour tenir compte des encastremens partiels éventuels dus à la réalisation des attaches doivent être utilisées avec la plus grande prudence.

✓ **Voilement de goussets**

Les goussets assemblant des barres comprimées doivent être étudiés au flambement. Les flambements de goussets de l'attache de poinçon de ferme sont des cas fréquents de sinistre sous charges verticales.

Le remède à ce risque de flambement consiste à réduire le plus possible l'écart entre les extrémités des arbalétriers et à raidir transversalement l'assemblage par un couvre joint (cornières de doublage pliées ou soudées) [74].

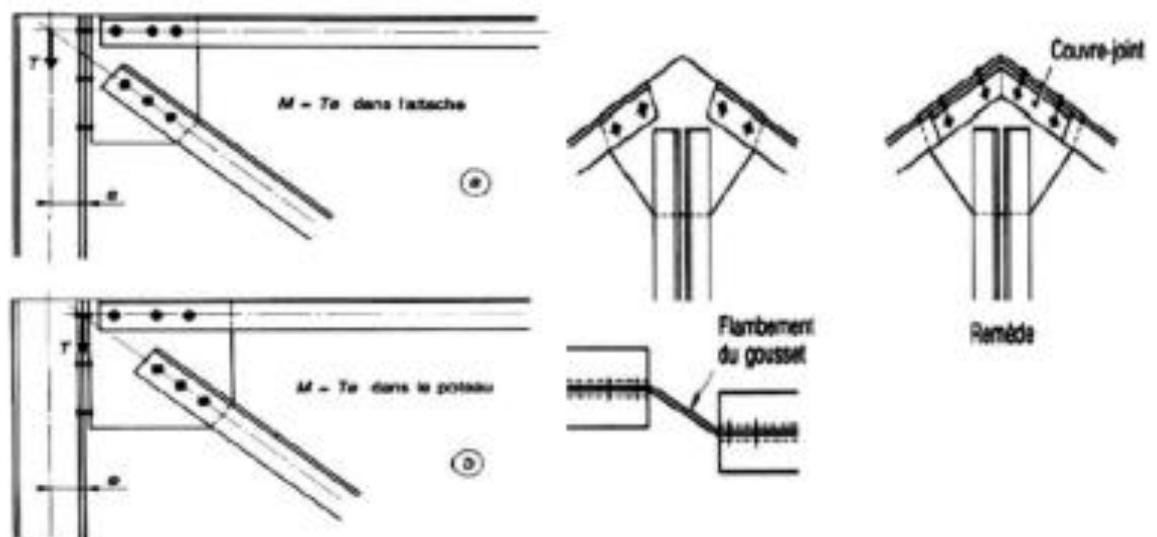
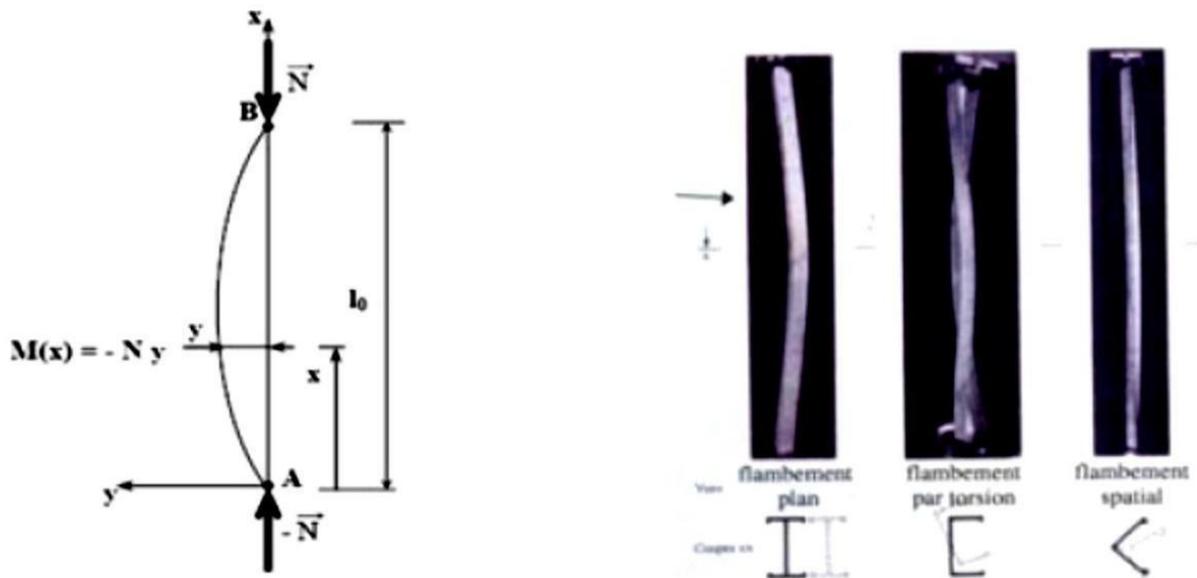


Figure I.8: Flambement de goussets [74].

### ✓ *Flambement des colonnes*

Le flambement est en fait une sollicitation composée de compression et de flexion, mais dont l'étude est différente de la flexion composée parce que les méthodes sont différentes et que le flambement est un phénomène rapidement destructif. En effet, dans le cas du flambement, les déformations ne peuvent plus être supposées infiniment petites.

De même, les forces extérieures ne sont plus proportionnelles aux déformations et, dans certains cas, de grandes déformations peuvent être causées par des accroissements de charge infimes. Tous ces phénomènes sont connus sous le nom d'instabilité élastique. Le risque de flambement d'un élément étant lié aux dimensions de cet élément, on dit que le flambement est un phénomène d'instabilité de forme [15].



*Figure 1.9: Phénomène de flambement [15]*

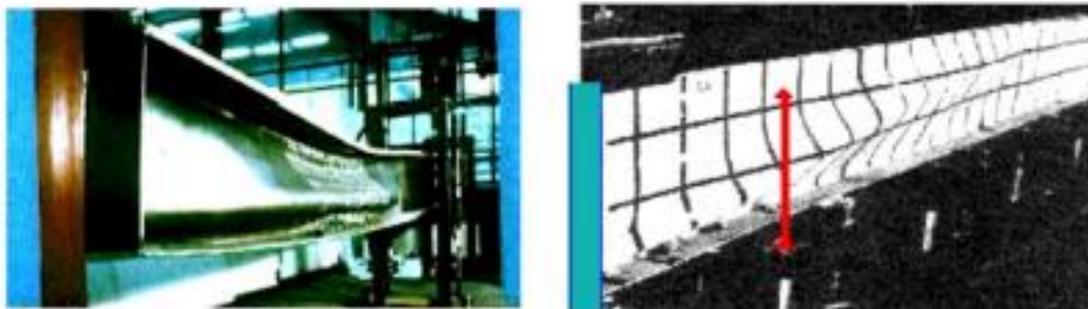
Les manières les plus efficaces d'améliorer la résistance au flambement consistent à accroître les dimensions de la section droite et/ou d'utiliser un contreventement et des maintiens de manière à modifier le mode de flambement.

- ✓ La stabilité d'un portique à ossature rigide est contrôlée par la stabilité de ses poteaux individuels.
- ✓ La stabilité d'un portique à ossature souple est contrôlée par la rigidité de flexion des poteaux et des poutres et par la rigidité des liaisons poutres/poteaux [40].

### ✓ *Voilement des plaques*

Le voilement d'une âme de poutre est un phénomène de déformation de l'âme sous l'action des contraintes de compression et des contraintes de cisaillement. La solution effectuée pour la

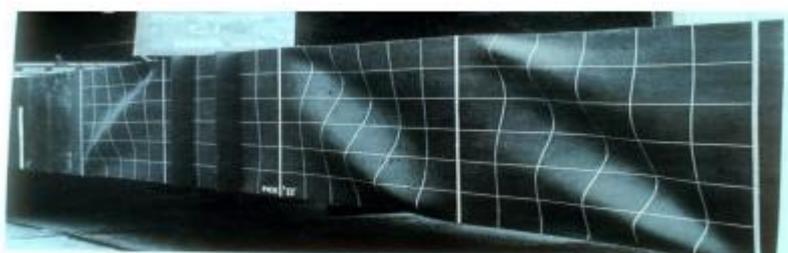
compensation du risque du voilement de l'âme est l'emplacement des raidisseurs opportun définis par le calcul en fonction des efforts appliqués à la poutre. Le but de l'essai était de déterminer les limites dans le changement de direction de la semelle pour lesquelles l'âme peut ne pas être raidie [39].



*Figure I.10 : Phénomène de voilement [43].*



*Figure I.11 : Phénomène de voilement total de l'âme [43].*



*Figure I.12: Voilement local de la membrure de l'âme supérieure [43].*

#### ✓ Déversement des poutres

Les éléments fléchis qui ne sont pas soutenus latéralement présentent un risque de déversement ; ce type de ruine est plus probable encore si la section est soumise à torsion, notamment si les charges appliquées ne sont pas au droit du centre de torsion de la section [51].



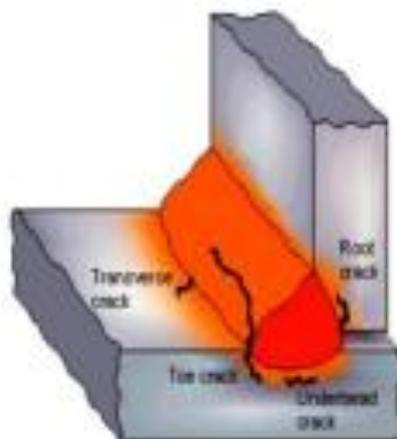
*Figure I.13: Phénomène de déversement des poutres [15].*

### **1.2.7.2. Défauts des soudures**

Les défauts métallurgiques de soudage sont :

#### **✓ Fissuration à chaud**

La fissuration à chaud est causée par l'action des contraintes de retrait lorsque le métal est encore très chaud après le soudage et que sa ductilité est insuffisante. Elle apparaît donc sans délai et se manifeste sous forme de fissures longitudinales, localisées le plus souvent dans la partie centrale de la zone de métal fondu. Pour l'éviter : composition chimique du métal fondu (mélange de métal de base et de métal d'apport) : les teneurs en soufre et en phosphore doivent être suffisamment faibles, la largeur du cordon doit être suffisante par rapport à sa profondeur (rapport recommandé usuellement supérieur à 0,7) [42].



*Figure I.14 : Fissuration à chaud [42].*

**I.3. Conclusion**

Le passage du temps laisse sa trace sur les structures métalliques. Ce vieillissement est consécutif à une dégradation des propriétés mécaniques, physiques et chimiques de ce matériau de construction

On à vue dans ce chapitre que tous les mécanismes de dégradation des matériaux et perte de performance ou de comportement sont dues par plusieurs facteurs qu'on ne peut pas les maîtrisés tous, donc la notion de la structure parfaitement durable c'est une notion irréalisable, cette vulnérabilité des structures nous exige à faire recourt à des réparations ou des renforcements à travers le cycle de la vie de l'ouvrage.

## Chapitre II

# Techniques de réhabilitation des structures



## II.1. Introduction

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

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

Durant de nombreuses années déjà, le renforcement par matériaux composites est utilisé avec succès pour la réparation des structures métalliques

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

## II.2. Définition des techniques de réhabilitation

### II.2.1. Réhabilitation

Le terme réhabilitation peut s'appliquer à des opérations de réparation ou de renforcement ; la réparation vise à retrouver les performances initiales d'une structure endommagée, alors que le renforcement consiste en une amélioration des performances d'une structure, endommagée ou non, pour répondre à de nouveaux besoins ou pour répondre à un besoin de remise en conformité avec des niveaux de sécurité exigés par les différentes réglementations en vigueur, dont les exigences en déformabilité et en résistance ; la technique de renforcement vient pour donner à la structure ou l'élément de structure ce qu'il a perdu dans des conditions non prévues à l'origine. Un des renforcements les plus importantes sont les renforcements parasismiques de différentes natures comme l'augmentation de la résistance aux efforts latéraux, l'augmentation de la ductilité, ou encore combiner ces deux aspects, afin de satisfaire aux nouvelles exigences de résistance aux séismes. [31]

### II.2.2. La réparation

La réparation d'une structure est une opération qui consiste à lui restituer, par des travaux appropriés, un niveau de service perdu, la baisse du niveau de service peut résulter de toutes

sortes de causes ; les plus fréquentes sont la dégradation progressive des matériaux (agressions atmosphériques, modification des propriétés des matériaux), l'utilisation intensive (effet de répétition des charges) voire abusive (utilisation au-delà des charges prévues), les accidents et sinistres (incendies, choc ,séisme, ...). [16] [17]

### ***II.2.3. Le renforcement***

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service et en particulier (augmentation de la ductilité, de la résistance) d'une construction pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'origine ou de lui procurer une protection suffisante contre des sollicitations dont il n'a pas été tenu compte dans les calculs [16] [17].

#### ***II.2.3.1. Historique sur le renforcement des structures***

Il existe deux causes principales derrière les défaillances dans les structures, il s'agit d'un changement de fonctionnalité (La sur-augmentation des charges d'exploitation) ou bien la détérioration des matériaux utilisés. Le vieillissement de ces matériaux (Acier, alliages ou autres matériaux traditionnels), est un souci inquiétant pour les ingénieurs, ce qui confirme le besoin d'une avancée technologique dans le domaine du renforcement. Dans ce contexte, plusieurs méthodes ont été utilisées durant les années 1960, parmi lesquelles, la méthode de soudure des plaques d'acier à la structure a été largement utilisée pour le renforcement des structures endommagées, étant donné que cette méthode améliorait la rigidité, la résistance et réduit les fissures ainsi que leurs propagations Cette méthode avait des inconvénients, en effet, la tôle d'acier subissait la corrosion qui dégrade et fragilise la structure, c'est un grand problème susceptible d'annuler toute l'opération de renforcement. Aussi, la mise en œuvre de cette technique s'est avérée difficile en raison du poids et de la taille des tôles d'acier. La technique du renforcement par composite en fibre durant les dernières décennies apparaît comme une solution de renforcement des méthodes traditionnelles. Elle consiste à coller des plaques en composite FRP (Les composites en fibres de carbone...etc.) en utilisant les nouvelles colles époxy. Cette technique de renforcement, est une excellente alternative par rapport à l'ancienne méthode utilisant les plaques d'acier et ce, en raison de ses avantages dans le domaine du génie civil, dans le domaine aéronautique et dans l'aérospatial. Cette technique a été commercialisée durant les Années 1980 aux Etats-Unis, en Europe et au Japon. Des applications ayant pour but la prévention de la détérioration des structures lors des séismes et des catastrophes naturelles. Le séisme Hyogoken\_Nanbu, qui a dévasté la ville de Kobe au Japon en 1995, a été un élément accélérateur de la recherche dans le domaine du renforcement des constructions par la nouvelle technique des composites FRP. [68]

### ***II.2.3.2. Les avantages du renforcement***

- La résistance, la ductilité et la déformation d'un béton renforcé sont plus élevées,
- La flexibilité des composites permet de confiner des colonnes de différentes géométries,
- Le poids de l'élément renforcé par les composites est peu modifié, vu la légèreté des Composites
- L'enveloppe de composites ne modifie pas l'apparence des colonnes ou des structures.
- Certaines composites résistent très bien aux variations de température, aux cycles de gel dégel et à l'humidité. [13]

## **II.3. Techniques de réparation et renforcement des structures métalliques**

Il est défini en fonction de la nature et de l'importance des désordres constatés, le choix de la méthode de réparation et des matériaux à mettre en œuvre, en tenant compte des critères économiques des matériaux de construction, des conditions de chantier et des contraintes de site. Le principe de renforcement ou de réparation consiste en adjonction de matière dans les zones où les sections sont trop sollicitées. Une section devient trop sollicitée si, du fait même des dispositions adoptées ou du changement des conditions d'exploitations, les efforts appliqués sont supérieurs à ceux pris en compte dans les calculs (problème de renforcement), ou bien si la résistance a diminué par suite de dégradation (problème de la réparation) [34].

### ***II.3.1. La peinture***

La peinture est une technique de protection de surface utilisée depuis très longtemps. C'est le Mode universel de protection de l'acier contre la corrosion. L'obtention d'une épaisseur suffisante de peinture est souvent obtenue par l'application de plusieurs couches successives. Les étapes à suivre pour réussir cette méthode de réparation sont les suivantes :

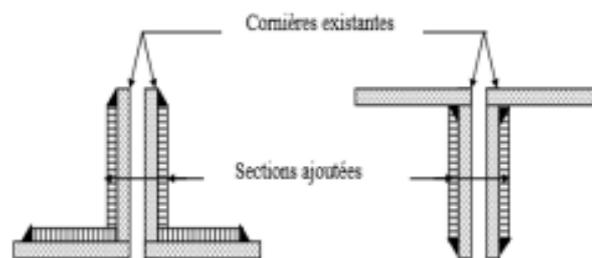
Le nettoyage de la surface à protéger : c'est l'étape principale de cette méthode de Réparation, car la durée de la protection étant d'autant plus longue que, le nettoyage a été plus soigné. Appliquer la première couche de peinture avant que la surface ne soit salie à nouveau. Vérifier après chaque couche de peinture qu'il ne reste pas de vides, de manques et de cloques qu'il conviendrait de retourner (il convient d'utiliser des couleurs différentes pour faciliter les vérifications). Vérifier l'épaisseur des différentes couches. [70]

### II.3.2. Le zingage

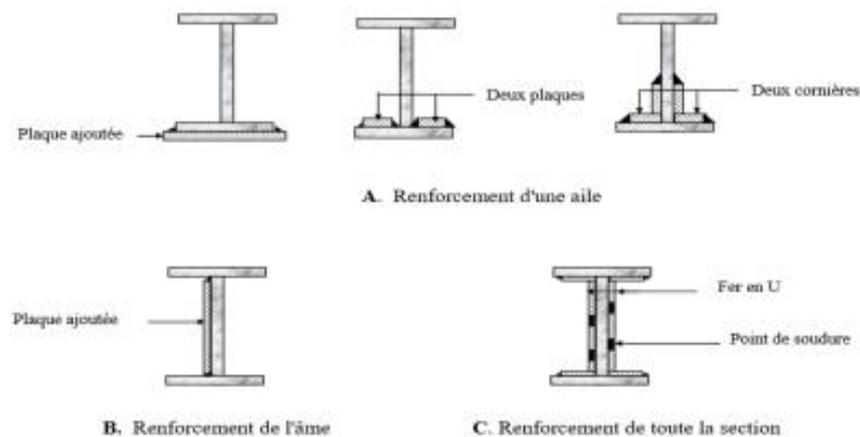
Ce revêtement est utilisé pour obtenir une protection plus durable que celle fournie par les procédés classiques de peinture. C'est le traitement d'une surface d'acier en y apposant une couche de zinc remplissant une fonction de protection anticorrosion. La couche de zinc est protégée elle-même par une bonne peinture dans les climats humides ou tropicaux. Les opérations de pliages, le brûlage ou les soudures doivent être effectuées avant le zingage, car elles brûlent ou écaillent le zinc protecteur [70].

### II.3.3. Le placage

Lorsque l'abrasion et la corrosion sont limitées à quelques éléments ou parties d'éléments d'ouvrage, une manière commode et économique de compenser la diminution de section est d'appliquer du métal neuf sur les pièces détériorées. Pour ce faire, on peut prendre des plaques ou des feuilles de métal roulées, les mettre en place en les faisant déborder de part et d'autre de la partie d'élément dégradé, et les souder sur les parties en bon état (**Figures II.1 et II.2**). [35]



*Figure II.1 : Exemple de la mise en place de plaques de renfort d'un élément de cornières. [35]*



*Figure II.2 : Détails de mise en place de renforts de poutre à larges ailes [35].*

### ***II.3.4. Réparation par soudage, boulonnage***

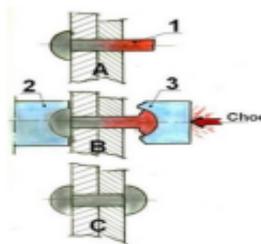
Pour réaliser la réparation par les deux méthodes : zingage ou bien placage, on doit utiliser soit la soudure soit le boulonnage. Ces deux types de réparation sont les techniques les plus utilisées pour la réparation des structures en charpente métallique. La première technique (la soudure) est considérée comme étant le moyen le plus souple et le plus efficace pour réparer ou renforcer un ouvrage. C'est une opération d'assemblage qui assure la continuité métallique de deux pièces par phénomène de fusion locale. La deuxième technique (le boulonnage) peut être utilisée pour certains petits ouvrages. Elle Permet d'éviter tout assemblage soudé. [35]



*Figure II.3 : Soudage à l'arc avec fil fourré [21].*

### ***II.3.5. Réparation par rivetage***

Un rivet est un élément d'assemblage définitif. Il se présente sous la forme d'une tige cylindrique, généralement métallique, pleine, qui est munie à l'une de ses extrémités d'une « tête » c'est-à-dire une partie de section plus grande. L'autre extrémité sera forgée à chaud, de façon à former une tête seconde pour solidariser les éléments à assembler. Cette opération est désignée sous le terme de rivetage. La construction des ponts en arc, à poutres treillis ou âme pleine, au XIXème siècle et début du XXème, avant le développement de la soudure, a largement fait appel à ce mode d'assemblage par rivetage. [9]



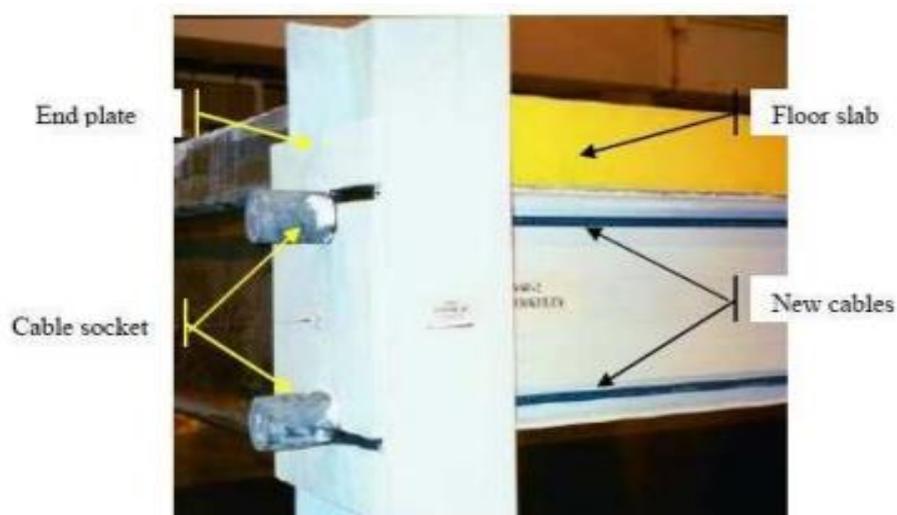
*Figure II.4 : Rivet constitution d'un assemblage. [9]*



*Figure II.5 : Pose d'un rivet à tête ronde et gougeage de la tête de rivet. [9]*

### ***1.3.6. La technique de précontrainte additionnelle***

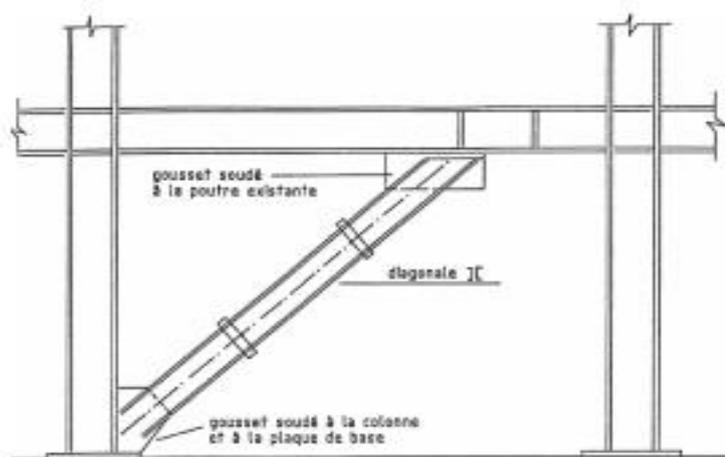
Cette technique consiste à mettre en œuvre une précontrainte (câbles, barres ou torons) dans un ouvrage pour en améliorer la résistance d'ensemble vis-à-vis de la flexion et/ou de l'effort tranchant. Cette dernière permet la mise en œuvre et la conservation d'efforts de précontrainte appliqués à des ouvrages existants dans le but de leur redonner leur état de service (réparation) ou de leur donner un nouvel état de service (renforcement). Cette méthode de renforcement bien que très efficace présente quelques difficultés de mise en œuvre d'après Cusin. En effet, elle nécessite de dimensionner soigneusement des ancrages et des forages à travers certaines parties de la structure existante sont nécessaires. La **Figure II.6** montre le principe de renforcement par précontrainte additionnelle d'une structure métallique. Le câble métallique à haute résistance de diamètre 19 mm est attaché à la poutre et au poteau par le biais d'une plaque d'ancrage. [19] [69].



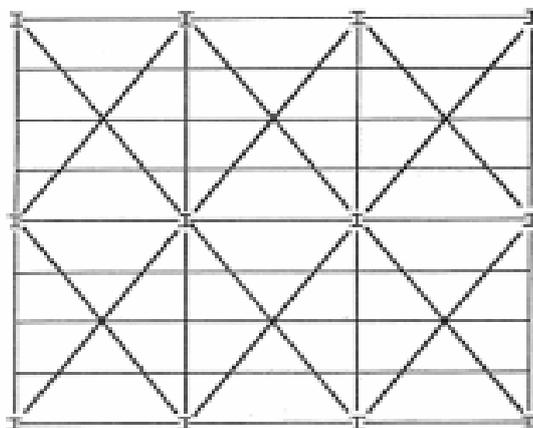
*Figure II.6: Principe de renforcement par précontrainte additionnelle [69]*

### II.3.7. Addition d'éléments structurels complémentaires

Si des modifications d'utilisation de la structure ou des augmentations des actions de service l'imposent, il peut être nécessaire dans une structure existante d'introduire des éléments structurels complémentaires (poutre maîtresse, raidissage par treillis verticaux ou horizontaux). Les **Figures II.7** et **II.8** montrent respectivement le renforcement d'un portique par une triangulation excentrée et le renforcement d'un plancher en portique plan par triangulation.



*Figure II.7 : Renforcement d'un portique par une triangulation excentrée. [6]*



*Figure II.8 : Renforcement d'un plancher en portique plan par triangulation. [6]*

### II.4. Structures renforcées par matériaux composites :

La pathologie structurelle issue des erreurs de conception lors du dimensionnement ou lors de l'exécution, des défauts de résistance à l'effort tranchant ou en flexion due au chargement excessif, ainsi que celle liée à la fatigue de la structure sous chargement cyclique sont à l'origine de la diminution de la durée de vie théorique des structures. Face à ce problème, la réparation ou le renforcement par collage de matériaux composites s'avère être une technique

prometteuse. De nos jours, le collage de matériaux composites est l'une des méthodes de réhabilitation les plus utilisées dans ce marché grâce aux avantages des matériaux composites : la facilité de mise en place, l'inertie à la température ambiante et la très bonne tenue à la fatigue. Pour l'amélioration de la résistance des structures, on utilise les matériaux composites (FRP). [73]

#### ***II.4.1. Renforcement par collage de plats métalliques :***

Ce procédé est un apport d'armatures extérieures soit pour consolider un élément dont les dégradations mettent en péril la résistance, soit pour remplacer des aciers oubliés, ou mal positionnés. La préparation des surfaces, la mise en œuvre des colles et la réalisation du placage, doivent impérativement être confinées à des entreprises spécialisées. [11]



***Figure II.9 : Renforcement par plats métalliques [11]***



***Figure. II.10 : Tôles collées ; (a) difficulté de manutention ; (b) Renforcement du viaduc de Terrenoire par tôles collées perforées -Brevet Freyssinet [58]***

#### ***II.4.2. Renforcement par collage de plats composites***

Les premières études sur le comportement mécanique d'une structure en charpente métallique, renforcée par collage de matériau composite sont réalisées dans le laboratoire fédéral Suisse par Meier et Kaiser. L'augmentation de la capacité portante, par rapport à une

poutre non renforcée de référence était de 200%. La constatation a été faite que la propagation des fissures de cisaillement peut entraîner le décollement prématuré du renforcement extérieur en matériau composite [76].



*Figure II.11: Différentes méthodes de renforcement par le collage de plaques en composites. [49].*



*Figure.II.12 : Procède Par Collage De Plaques [71].*

#### **II.4.3. Renforcement des structures par des polymères renforcés de fibres (FRP)**

Les matériaux composites innovants en fibres ont gagné de la place dans la conception des nouvelles structures de hautes performances, telles que les applications, automobiles, aéronautiques et aérospatiales qui nécessitent des composants légers dotés de propriétés

mécaniques supérieures afin de résister dans des conditions de services trop sévères et d'obtenir une efficacité mécanique et énergétique optimale. Cependant, l'un des principaux défis auxquels l'industrie est confrontée avec les nouveaux matériaux composites est le comportement complexe des dommages. Les matériaux composites sont principalement utilisés pour réhabiliter les structures endommagées par des sollicitations mécaniques et des conditions environnementales sévères, tels que les charges mécaniques, les effets thermiques et hygrothermiques. Les réparations par collage des composites (par exemple, des patches ou des plaques) sont généralement préférées car elles fournissent des mécanismes du transfert des contraintes améliorés, de bons rendements des joints et des performances supérieures. Avec l'utilisation accrue des composites avancés dans les éléments structurels, il est donc essentiel de disposer des procédures de réparation par collages robustes, fiables et reproductibles pour restaurer les parties endommagées des structures.

Les « fibers reinforced polymers » (FRP) utilisés pour les ouvrages et les constructions métalliques sont de plus en plus répandus ces dernières années. En général, les FRP offrent une excellente résistance à la corrosion, une bonne résistance à la fatigue (à l'exception peut-être de certains FRP à base de verre), une faible densité, une rigidité et une résistance élevées et un très faible coefficient de dilatation thermique dans le sens longitudinal des fibres. Garden et Hollaway [23] ont décrit les matériaux FRP comme dotés de propriétés mécaniques et physiques supérieures à celles de l'acier, en particulier, en ce qui concerne les résistances à la traction et à la fatigue. De plus, leurs qualités sont maintenues sur une large plage de températures. Cependant, leur prix est plus élevé, leurs contraintes de défaillance sont relativement faibles et leurs performances sont très acceptables. Certains matériaux FRP peuvent être jusqu'à 10 fois plus légers que le poids des matériaux structurels et traditionnels, tels que l'acier et les alliages. Ainsi, les fibres FRP sont généralement considérées pour des applications spéciales, telles que les structures, ou pour une utilisation dans des environnements corrosifs et agressifs. Cependant, leur utilisation est plus économique que l'utilisation de plaques d'acier, cela s'explique par le fait que le coût des matériaux en fibres dans un projet de réhabilitation dépasse rarement 20% du coût total de la réparation, les 80% restants sont principalement consacrés à la main-d'œuvre et aux coûts de la préparation et de la mise en œuvre. Le processus d'application des FRP peut être effectué à partir d'un échafaudage léger ou d'une plate-forme mobile, souvent dans une période de 24 heures, par rapport à plusieurs jours concernant des plaques d'acier très lourdes et d'un système d'échafaudage complexes. [24] ont décrit les matériaux fibreux couramment utilisés, notamment le verre, l'aramide et le carbone. Les fibres sont disponibles sous de nombreuses

formes telles que les plaques, les tissus uniaxiaux et les feuilles. Parmi le matériau le plus disponible, le stratifié de polymère renforcé de fibres de carbone (FRP) il s'agit d'un choix de matériau plus apprécié en raison de sa résistance bien élevée. Bien que les FRP soient plus efficaces pour le renforcement en flexion que pour le renforcement en cisaillement en raison de ses propriétés anisotropes, un renforcement en cisaillement peut être obtenu si l'orientation des fibres est bien choisie. Pour renforcer les poutres, les techniques d'application de FRP sur la face de ces poutres (voir **Figure II.13**) sont similaires à l'application des plaques d'acier. [10]

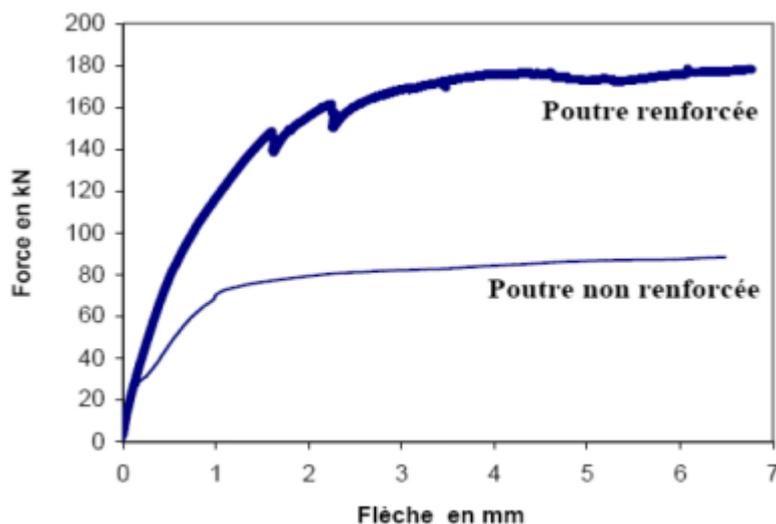


*Figure II.13 : Renforcements des structures par des plaques en FRP [10].*

Le pont d'Ibach situé à Lucerne, en Suisse, a été le premier à subir une réparation à l'aide du matériau composite FRP. Un total de 6,2 kg de CFRP a été appliqué sur le pont au lieu de 175 kg de plaques d'acier. La première étape vers le développement de FRP pour la réhabilitation des structures en acier et en béton consistait à déterminer les avantages et les inconvénients. Les projets de recherche sur l'utilisation des matériaux FRP comme moyen de réhabiliter les éléments en flexion ont montré des résultats toujours positifs. Ces enquêtes ont permis de déterminer que les feuilles de FRP externes se comportaient comme un renforcement conventionnel. Le travail effectué par Saadatmanesh et Ehsani, [67] avait principalement porté sur la réhabilitation de poutres armées à l'aide des feuilles de verre (GFRP).

Les résultats ont montré qu'une augmentation dans la section transversale de la feuille appliquée et l'épaisseur de l'époxyde utilisée, entraînent une augmentation de la résistance à la flexion. Les données expérimentales concordent étroitement avec les résultats théoriques analytiques ont pour la première fois décrit l'application du polymère renforcé de fibres de carbone (FRP) en tant que méthode de réparation. En raison de la grande rigidité ajoutée à l'élément par la feuille de fibre de carbone, les flèches dans les poutres étaient

considérablement inférieures à celles dans les poutres modèles **Figure II.14**. De plus, la taille et la répartition des fissures dans les poutres ont été considérablement modifiées. Les largeurs des fissures étaient beaucoup plus petites, les fissures étant réparties plus uniformément sur toute la longueur de la poutre.



*Figure II.14 : Comparaison du comportement mécanique de la poutre renforcée et celle non renforcée [73].*

#### **II.4.4. Limites et conditions d'utilisation des FRP pour le renforcement :**

L'application des FRP ne supprime ni les causes ni certains effets de la détérioration. De plus, elle est subordonnée à une qualité minimale du béton de substrat. Elle ne peut donc être systématiquement retenue comme solution de renforcement.

Sa vulnérabilité au feu et son exposition aux actes de vandalisme imposent, à juste titre, d'appliquer, lors du design, des coefficients de sécurité qui peuvent parfois paraître pénalisants. D'autres effets, de température et environnementaux par exemple, incitent à plafonner la contribution des FRP [4].

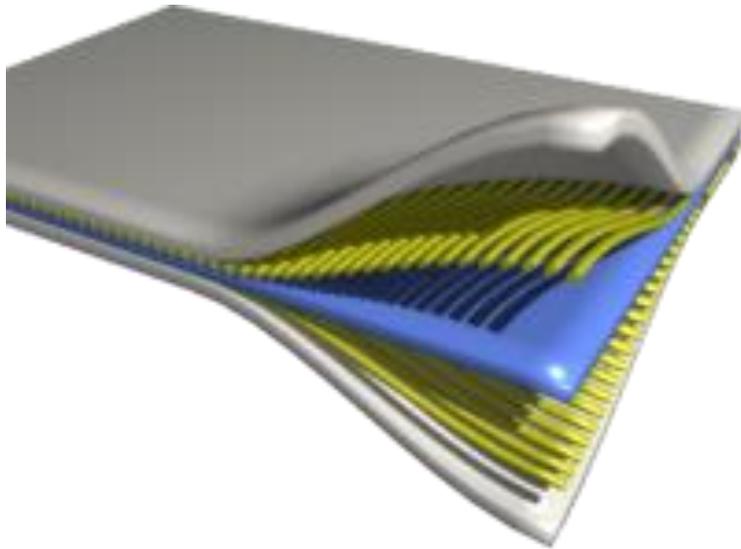
## **II.5. Conclusion**

Les structures métalliques subissent des détériorations continues pendant leur vie de service. Ces structures ont besoin d'être réhabilitées ou à remplacer, bien que la réhabilitation soit souvent l'alternative rentable.

Dans ce chapitre nous avons vu les Techniques de réhabilitation des structures métalliques. Le chapitre suivant va porter sur les matériaux composites et leur rôle dans génie civil.

# Chapitre III

## *Généralité sur les matériaux composites*



### III.1. Introduction

Au cours des dernières décennies, les matériaux composites ont été développés et ont une variété d'applications dans différents domaines (génie civil), en particulier là où des améliorations de la capacité portante, de la rigidité et de la résistance à la corrosion sont requises. Les structures dégradées par une capacité surchargée, l'environnement et un mauvais entretien doivent être réparées et réhabilitées.

Les composites offrent des avantages significatifs par rapport aux matériaux traditionnels. Ils offrent de nombreux avantages fonctionnels : légers, durables Mécanique et chimique, entretien réduit, liberté de forme. De par leurs propriétés, ils peuvent prolonger la durée de vie de certains équipements.

### III.2 Historique des matériaux composites

Les premières utilisations des composites remontent aux années 1500 av. lorsque les premiers égyptiens et les colons mésopotamiens ont utilisé un mélange de boue et de paille pour créer des bâtiments solides et durables. La paille a continué à renforcer les anciens produits composites, notamment la poterie et les bateaux. Plus tard, en 1200 après JC, les Mongols ont inventé le premier arc en composite, à l'aide d'une combinaison de bois, d'os et de « colle animale ». Ces arcs étaient extrêmement puissants et extrêmement précis. Les arcs mongols composites donnèrent à Gengis Khan une domination militaire et, en raison de la technologie composite, cette arme était l'arme la plus puissante sur la planète jusqu'à l'invention de la poudre

À canon. L'ère moderne des composites n'a pas commencé jusqu'à ce que les scientifiques développent les plastiques. Jusque-là, les résines naturelles dérivées de plantes et d'animaux étaient la seule source de colles et de liants. Au début des années 1900, des plastiques tels que le vinyle, le polystyrène, le phénolique et le polyester ont été mis au point. Ces nouveaux matériaux synthétiques ont surpassé les résines dérivées de la nature. Cependant, les plastiques seuls ne pourraient pas fournir une résistance suffisante pour les applications structurelles. Le renforcement était nécessaire pour fournir la force et la rigidité. En 1935, Owens Corning Introduisit la première fibre de verre associée à un polymère plastique, la fibre de verre crée une structure incroyablement solide et légère. C'est le début de l'industrie des polymères renforcés de fibres (FRP) qu'on connaît aujourd'hui [44].

### III.3 Qu'est-ce qu'un matériau composite ?

Le matériau composite est constitué de l'assemblage d'au moins deux matériaux non-miscibles et de nature différente, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Les matériaux composites sont des matériaux à hautes performances mécaniques, façonnables à volonté au gré du concepteur et donc doué d'un potentiel illimité, se développent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines et sont à l'origine de formidables challenges dans diverses réalisations de haute technologie. [29]

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans l'industrie automobile, Ferroviaire, aéronautique et l'industrie aérospatiale en matériaux à caractéristiques Mécaniques élevées associés à un faible poids. Ils sont extrêmement rigides, résistants et légers et leurs performances spécifiques sont supérieures à celles des métaux. [3]

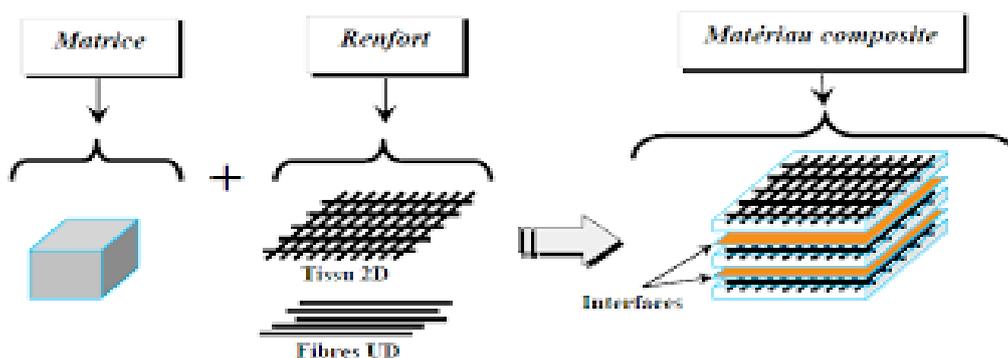


Figure.III.1 : constituants d'un matériau composite [64]

Tableau.III.1 : les différents types de composites. [8].

Type de composite	Constituants	Domaine d'application
1/composites à matrice organique - Papier - Carton - Panneaux de fibre toiles enduites - Matériaux d'étanchéité et pneumatiques	- Résine/fibre cellulosique - Résine/copeaux - Résine/tissus - Elastomère - Caoutchouc/acier	- Imprimerie - Bâtiment - Toitures - Automobile
2/Composites à matrice minérale - Bidon - Composite-carbone	- Ciment/sable/granulats - Carbone/fibres	- Génie civil - Aviation - Espace
3/ Composites à matrice métallique	- Aluminium/fibres de bore - Aluminium/fibres de carbone	- Aero/spécial

### III.4. Avantage et inconvénients des matériaux composites

#### III.4.1. Avantage des matériaux composites

- Gain de masse.
- Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structures métallique).
- Grande résistance à la fatigue.
- Faible vieillissement sous l'action de la corrosion.
- Insensibles aux produits chimiques « mécaniques » comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvant, pétrole. [66]

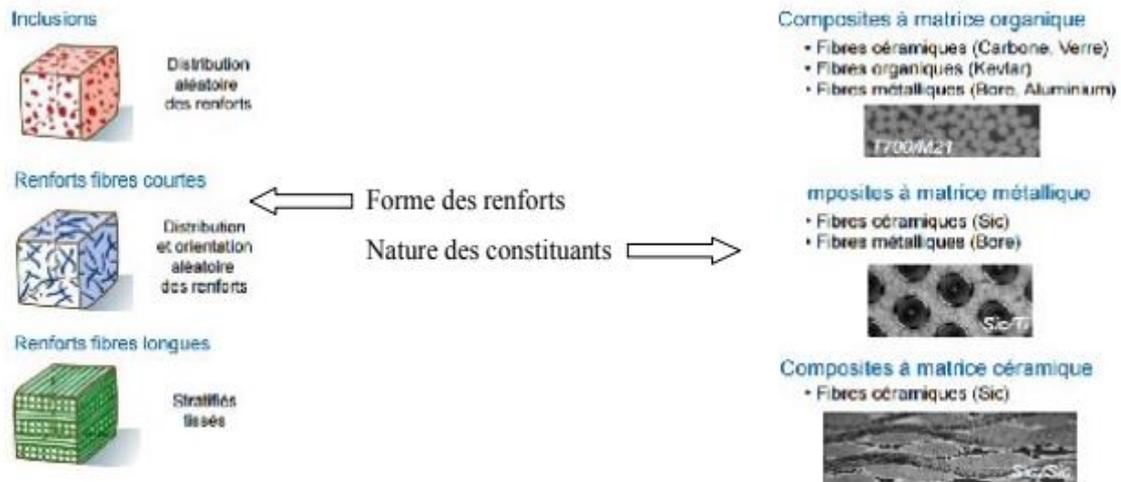
#### III.4.2. Inconvénients des matériaux composites

- Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température.
- Attention aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes.
- Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métalliques.
- Meilleure tenue au feu que les alliages mais émission de fumées toxiques pour certaines matrices.
- Coût parfois prohibitifs, le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries. [66]

### III.5. Classement d'un matériau composite

Les différents types de matériaux composites se définissent en fonction de la nature de la matrice qui pourra être de type organique, métallique ou céramique, et des renforts pouvant aussi être de natures très différentes comme par exemple, le carbone et le verre pour les inorganiques, les polyaramides (Kevlar) pour les organiques. Les géométries des renforts pourront varier suivant le type de propriétés mécaniques recherchées. Ainsi, les renforts sont des particules, des fibres courtes ou continues ou encore des plaquettes [38].

Les composites à matrice organique, ne peuvent être utilisés que dans les cas où les températures ne dépassant pas 200 à 300°C, Les composites à matrice métallique qui sont utilisés jusqu'à 600°C et les composites à matrice céramique, qui peuvent être utilisés au-delà de 1000°C. [6]



*Figure.III.2 : Classification des matériaux composites [6].*

### III.6. Les constituants des matériaux composites

On appelle maintenant de la façon courante « matériaux composites » des arrangements de fibre-continues ou non d'un matériau résistant (le renfort) qui sont noyées dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible [22].

Les matériaux composites structuraux sont principalement constitués de deux phases :

- ❖ La matrice : son but est de réaliser la liaison entre les renforts, leurs protections vis-à-vis des agents agressifs et la prévention contre une rupture catastrophique.
- ❖ Le renfort : son rôle est d'assurer la fonction mécanique. Il se présente généralement sous la forme de fibres dont l'orientation au sein du composite dépend de la sollicitation mécanique qu'elle doit supporter.

#### III.6.1. La matrice

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

- Support et protection chimique des fibres ou particules ;
- Répartition et transfert de charges.
- Donner la forme désirée au produit final. [62]

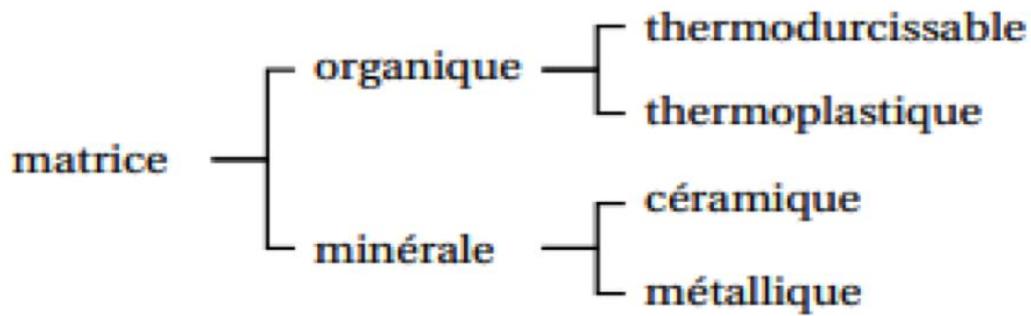


Figure III.3 : Type de matrice [62].

### III.6.1.1. Les matrices organiques

Un très grand nombre de matériaux plastiques peuvent être utilisés comme matrice dans les matériaux composites. Ils peuvent aussi bien appartenir à la famille des résines thermodurcissables qu'à celle des résines thermoplastiques. [31]

#### ✓ Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables sont les plus employées comme matrice des matériaux composites structuraux. Comme leur nom le laisse entendre, 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, ni même se ramollit sous l'effet de la température.

De ce fait, ils ne peuvent être mis en forme qu'une seule et unique fois et ceci avant qu'ils ne durcissent, donc avant l'accomplissement du cycle de polymérisation.

Les résines thermodurcissables les plus répandues sont les polyesters, les époxydes, les polyamides, les phénoliques et les silicones. [31]

Le **tableau III.2** ci-après, présente les propriétés physiques et mécaniques de ces résines après polymérisation.

Tableau III.2: Propriétés des Résines thermodurcissables [31]

Propriétés en traction	Polyester	Epoxyde	Polyamide	Phénolique	Silicone
E <sub>OT</sub> (MPa)	30 à 90	30 à 100	Environ 90	20 à 60	20 à 60
AR (%)	2000 à 3000	2500 à 4000	Environ 3000	1000 à 5000	Environ 3000
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	1.1 à 1.3	1.1 à 1.3	Environ 1.3	1.2 à 1.4	1.0 à 1.1

Où E<sub>OT</sub>: est le module de Young ;AR : est l'allongement à la rupture.

### ❖ Résines polyesters

Les polyesters insaturés sont les résines les plus utilisées dans les applications grandes diffusion. Elles se présentent sous la forme d'une solution polyacide plus polyalcool qui se rigidifie sous l'action d'un catalyseur et de l'action de la chaleur. Elles présentent le grand défaut d'émettre des vapeurs de styrène au cours de la polymérisation et d'être difficiles à stocker [30].

- Préparation de polyesters insaturés

Trois monomères principaux sont employés pour la synthèse des polyesters non saturés : le propane-1,2- diol (propylène glycol), l'anhydride benzène di carboxylique (anhydride butène dioïque (anhydride maléique)). On obtient des polyesters ayant une masse molaire faible en utilisant une proportion non équilibrée des monomères et en limitant le degré de conversion [59].

- Polycondensation

Pendant la réaction de polycondensation, il se produit une certaine isomérisation des unités but-2-enedioïque cis de la chaîne de l'unité transe plus réactives. La dénomination polyester insaturé provient de la présence de ces liaisons doubles dans la chaîne. Celles-ci copolymérisent avec le styrène lors de la réticulation qui utilise en général un amorçage radicalaire classique [59].

### ❖ Résine époxyde

C'est la plus utilisée dans l'aéronautique ; elle présente un bon accrochage sur les fibres et de bonnes propriétés mécaniques. Elle possède de bonnes propriétés jusqu'à une température de 170°C mais elle est plus coûteuse que la résine polyesters [48].

Ses avantages sont : [25]

- ✓ Une adhérence parfaite sur les fibres.
- ✓ Une bonne propriété mécanique (en traction, flexion, compression, choc, et fluage, etc.), supérieure à celles des polyesters.
- ✓ Une mise en œuvre facile, sans apport de solvant.
- ✓ Une bonne tenue thermique, chimique et à la fatigue.

Ses inconvénients : [25]

- ✓ Coût élevé.
- ✓ Temps de polymérisation long.

- ✓ Vieillissement sous température.
- ✓ Sensibilité à l'humidité et aux rayons ultra-violets.
- ✓ Nécessite de prendre des précautions lors de la mise en œuvre.

#### ❖ Résine phénolique

Les résines phénoliques sont obtenues par la polycondensation du phénol et du formol ; elles présentent une très bonne tenue au feu, sans fumée (d'où leur utilisation dans le ferroviaire). Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à mettre en œuvre. [66]

#### ✓ Résines thermoplastiques

La famille des TP est très vaste qu'on peut séparer en plastiques de grande diffusion et plastiques techniques (techno-plastiques). Ce sont des polymères à chaîne linéaire, très répandus et peu coûteux (polyéthylène, polystyrène, polyéther cétone).

Ces résines peuvent être recyclées plusieurs fois suite à des chauffages et refroidissements cycliques. Elles sont fréquemment utilisées seules, sans renfort et sans charges.

Leurs propriétés intrinsèques sont suffisantes pour permettre la réalisation d'objets, de pièces à fonctions diverses, supports, mécanismes, emballages. Elles sont appelées couramment les plastiques et Généralement, associées avec des fibres de carbone ou de verre. [65]

**Tableau.III.3 : Comparaison entre les deux types de résines. [8]**

<b>TP (thermoplastiques)</b>	<b>TD(thermodurcissables)</b>	<b>Matrices</b>
Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser	Etat de base
Illimité	Réduit	Stockage
Difficile	Aisée	Mouillabilité des renforts
Chauffage + refroidissement	Chauffage continue	Moulage
Court	Long (polymérisation)	Cycle
Asses bonne	Limitée	Tenue au choc
Réduite	Meilleure	Tenue thermique
Recyclables	Perdus ou utilisés en charges	Chutes et déchets
Propreté	Emanations de solvants	Conditions de travail

### III.6.1.2. Matrices céramiques

Les matériaux utilisés sont les carbures de silicium et de carbone. Ils sont utilisés pour la fabrication des pièces qui subissent des contraintes d'origine thermique et leur coût est très élevé [60].

### III.6.1.3. Matrice métallique

L'utilisation des matrices métalliques est encore actuellement en grande partie à un stade préindustriel. Plusieurs matériaux composites tels que ; l'Aluminium et ses alliages, Nickel, Titane, présentent une bonne conductibilité électrique et thermique, une bonne tenue à des températures élevées et de plus ils possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques transverses. Leur fabrication conduit à des coûts très élevés [32].

### III.6.2. Le renfort

Ce sont des particules d'environ 50 microns de diamètre. Il existe des renforts fibre courte (de l'ordre du mm), des renforts fibre moyenne ou mi-longueur (de l'ordre du cm) et des renforts fibre longue (où les fibres font environ la taille de l'échantillon). Il représente l'armature, squelette, il assure la tenue mécanique (rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc.). Souvent de nature filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques), les fibres les plus utilisées dans l'industrie [32].

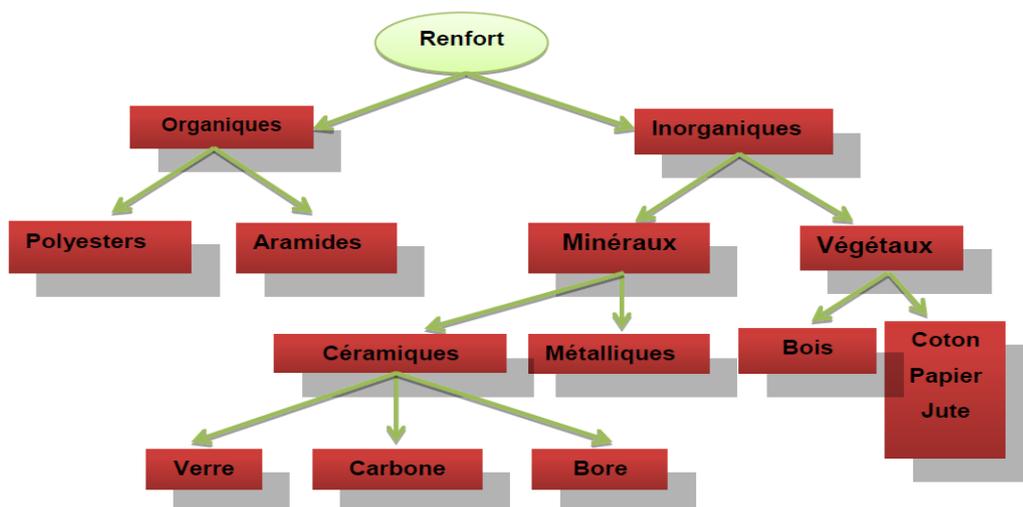


Figure.III.4 : Organigramme des différentes familles de fibres [32].

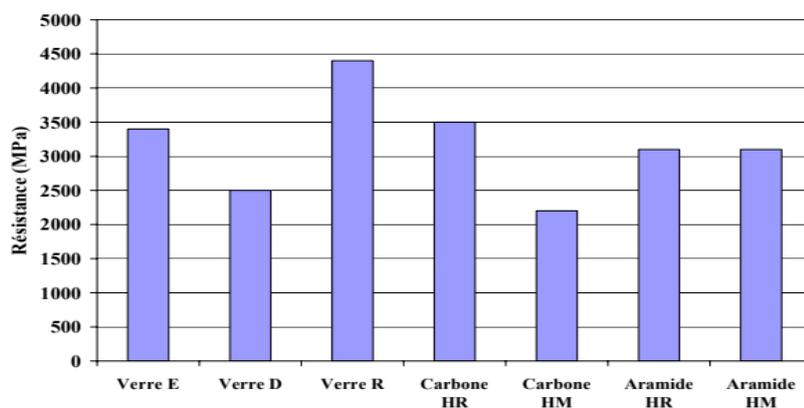
#### III.6.2.1. Les fibres

La fibre est constituée de plusieurs filaments élémentaires dont les diamètres varient entre 5  $\mu\text{m}$  et 25  $\mu\text{m}$ . Les lois de comportement des fibres sont de type "fragile". Il faut souligner le

fait que les lois proposées correspondent à des essais sur mono-filaments et que le comportement mécanique d'une mèche de 10 à 15000 filaments peut différer de façon significative dans la mesure où la probabilité de rupture des fils élémentaires joue un rôle important. Le **tableau III.4** récapitule les principales propriétés des fibres et le graphe de la **figure III.5** compare la résistance en traction de différents types de fibres. [52]

*Tableau III.4: Propriétés des fibres [52].*

Filament	Diam ( $\mu$ )	Densité	Traction (MPa)	Module (MPa)	Allons. (%)	Fusion ( $^{\circ}$ C)
<b>Verre E</b>	3-30	2.54	3400	73000	4.5	850
<b>Verre D</b>	3-30	2.14	2500	55000	4.5	-
<b>Verre R</b>	3-30	2.48	4400	86000	5.2	990
<b>Carbone HR</b>	8	1.78	3500	200000	1	2500
<b>Carbone HM</b>	8	1.8	2200	400000	0.5	2500
<b>Aramide HR</b>	12	1.45	3100	70000	4	480
<b>Aramide HM</b>	12	1.45	3100	130000	2	480



*Figure III.5 : Histogramme des propriétés en traction des fibres [52].*

### **Fibre de verre**

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

- E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- R : pour les composites hautes performances ;
- D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques). [61]



*Figure III.6 : Fibre de verre. [61]*

#### **Fibre de carbone**

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

- fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;
- fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C. [61]



*Figure III.7 : Fibre de carbone. [61]*

#### **Fibre d'aramide:**

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

- Les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ;
- La fibre haute module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances. [61]



*Figure III.8 : Fibre d'aramide. [61]*

### *Fibres de bore*

Elles peuvent être noyées sans difficulté dans des matrices métalliques et également organiques. Pourtant leur fabrication ne se fait pas facilement. Le bore est dur, fragile, rigide et ne peut pas être étiré. Par conséquent la fabrication des fibres de bore se fait par dépôt en phase vapeur du bore sur un filament de tungstène. Les fibres de bore possèdent des propriétés élevées en traction mais il faut également noter leurs bonnes propriétés en compression. [64].

**Tableau III.5 : Avantages et handicaps des différentes fibres [37].**

<b>Avantages</b>	<b>Handicaps</b>
<b>Les fibres de verre</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bonne résistance spécifique (pour le verre R).</li> <li>- Une bonne adhérence entre fibres et résines.</li> <li>- Tenue à la température élevée.</li> <li>- Dilatation et conductivité thermique faible.</li> <li>- Bon rapport de performances mécanique / prix.</li> <li>- Bonnes propriétés diélectriques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible module (par rapport au carbone ou aramide)</li> <li>- Vieillessement au contact de l'eau.</li> </ul>
<b>Les fibres de carbone</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Excellentes propriétés mécaniques,</li> <li>- Très bonne tenue en température (non oxydante).</li> <li>- Dilatation thermique nulle.</li> <li>- Bonne conductibilité thermique et électrique.</li> <li>- Bonne tenue à l'humidité,</li> <li>- Usinage aisé.</li> <li>- Faible densité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prix très élevé.</li> <li>- Précautions à prendre dans la mise en œuvre (fibre cassantes)</li> <li>- Tenue limitée aux chocs et à l'abrasion</li> <li>- Difficile avec les résines.</li> <li>- Mauvais comportement chimique avec :               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Oxygène 400 ° C</li> <li>- Acides oxydants chauds</li> <li>- Métaux à corrosion galvanique</li> </ul> </li> </ul>
<b>Les fibres de aramides</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bonne résistance spécifique à la traction</li> <li>- Faible densité.</li> <li>- Dilatation thermique nulle,</li> <li>- Absorption des vibrations, amortissement</li> <li>- Excellente résistance aux chocs et à la fatigue</li> <li>- Bon comportement chimiques vis à vis des carburants</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prix élevé,</li> <li>- Faible tenue en Pression</li> <li>- Reprise d'humidité importante (4 %) étuvage avant imprégnation</li> <li>- Faible adhérence avec les résines d'imprégnation</li> <li>- Usinage difficile</li> <li>- Tenue au feu, (décomposition à 400 ° C)</li> </ul>

#### **III.6.2.2. Forme du renfort**

Les renforts sont généralement composés des filaments. Décomposés en fil de base et en mèche puis en demi-produits comme la verranne, le stratifié (mèches de fils sans torsion,

direct, assemblé, bouclé, ensimés), la silionne (fils de 102 à 408 filaments ensimés), les fils coupés (de base, textiles, texturés, coupés, broyés, de 3 à 5 mm de long, ensimés), qui sont tous des fibres de tissage. Les particules peuvent être des billes pleines ou creuses, les fibrilles, les écailles. Les renforts sous forme de semi-produit tel que : les mats (feutres de silionnes ou de fils continus coupés, 25 à 50 mm agglomérés par un liant, les feutres, les rubans les tissus à armature taffetas, sergé, satin, unidirectionnelle, bidirectionnelle ou les gaines les tresses et les préformés. [45]

#### ❖ *Formes linéiques*

Les fibres sont élaborées suivant un diamètre de quelques micromètres (une dizaine), et ne peuvent par conséquent être utilisées sous forme unitaire. Pour leur utilisation pratique, ces fibres sont réunies en fils ou en mèches de différentes formes. La nomenclature générale des diverses formes linéiques est encore mal déterminée, et généralement dérivée de celle utilisée pour les fibres de verre. [46]

#### ❖ *Formes surfaciques*

Les fils peuvent être utilisés pour réaliser des formes surfaciques de divers types : mats, tissus ou rubans, essentiellement développés dans le cas de fibres de verre.

- Les mats : sont des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle. Ils sont maintenus ensemble par un liant soluble ou non dans les résines, suivant la mise en œuvre. L'absence d'orientation préférentielle des fibres conduit à une isotropie des propriétés mécaniques du mat dans son plan. [45]
- Les tissus et rubans : un tissu (ou ruban) est un ensemble surfacique de fils, de mèches, etc., réalisé sur un métier à tisser, il est constitué : de chaîne + tram ;

### III.7. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre une bibliographie générale sur les matériaux composites. Dans un premier temps, nous avons présenté le classement des matériaux composites et leurs constitutions, leurs performances pour le renforcement. Le chapitre suivant va porter sur le comportement des poutres métallique renforcées par des plaques en matériaux composites.

## *Chapitre IV*

*Comportement des poutres  
métalliques renforcées par  
matériaux composites*

## **IV.1. Introduction**

La technique des plaques collées en matériaux composites acquiert une importance croissante dans le domaine du renforcement des structures elle s'avère notamment intéressante pour le renforcement et la réparation des structures métallique le renforcement des poutres à l'aide des plaques en acier ou les plaques de FRP représente un récente technologie dans le domaine du génie civil.

Un certain nombre de différentes approches ont été étudiées pour évaluer l'efficacité de ces matériaux pour le renforcement et la réparation les structures en acier, y compris la réparation des poutres métalliques surchargées, la réparation des poutres dégradées.

Les recherches précédentes ont démontré que des matériaux composites peuvent être efficacement utilisés pour augmenter la résistance et la capacité ultime des poutres renforcées.

## **IV.2. Poutres métalliques renforcées par matériaux composites**

Semblable à une poutre en béton armé, une poutre d'acier peut être renforcée par collage de feuille en FRP. Nombreux auteurs s'accordent sur la technique de renforcement des structures en acier à l'aide de matériaux composites renforcés par des fibres vis-à-vis de la fatigue. [73]

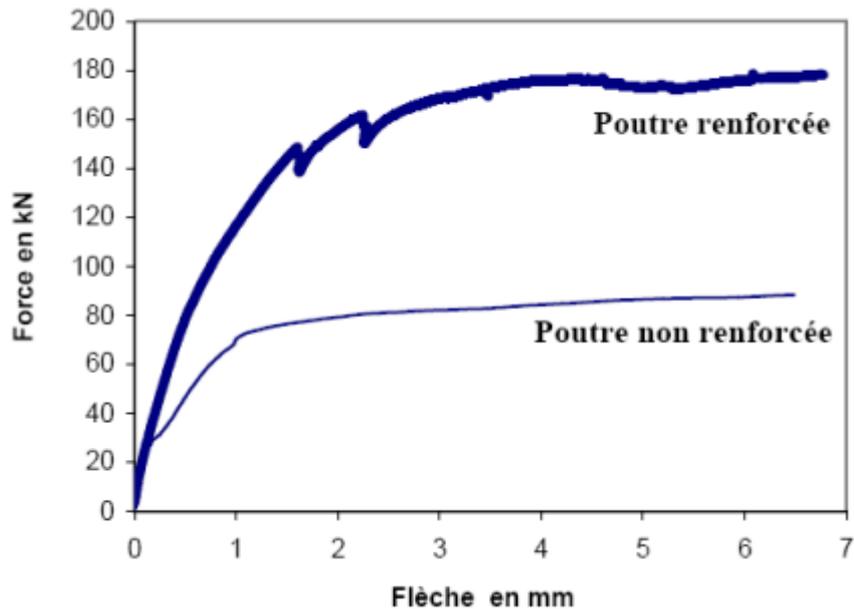
Les plaques d'acier peuvent aussi être adhésif-collé, mais la liaison est moins attrayante pour les plaques d'acier en raison de leur poids et le manque de souplesse dans la forme. Des plaques d'acier peuvent également être fixés par soudage à renforcer des structures en acier existantes, mais le collage de stratifiés de FRP est supérieure à la soudure de tôles d'acier dans les situations suivantes :

(1) Collage de stratifiés de FRP pour une meilleure résistance à la fatigue a l'avantage que le processus de renforcement ne présente pas de nouvelles contraintes résiduelles ;

(2) Dans certaines applications (par exemple des réservoirs de stockage de pétrole et des usines chimiques) où le risque d'incendie doit être minimisé, la soudure doit être évitée lors du renforcement d'une structure ; le collage de stratifiés de FRP est alors une alternative très attrayante

(3) les aciers à haute résistance souffrent de réduction de résistance locale importante dans les zones affectées par la chaleur de soudures, les stratifiés de FRP collés offrent une méthode de compensation de la force idéale. La **Figure IV.1** montre l'effet de l'adhésion des tissus de

FRP sur des surfaces de structures, une modification des comportements structuraux comparativement à ceux des structures non renforcées. [73]



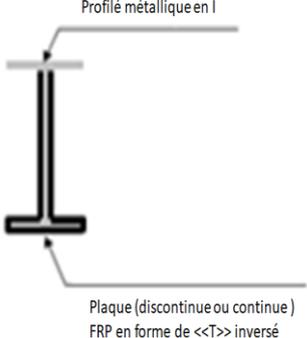
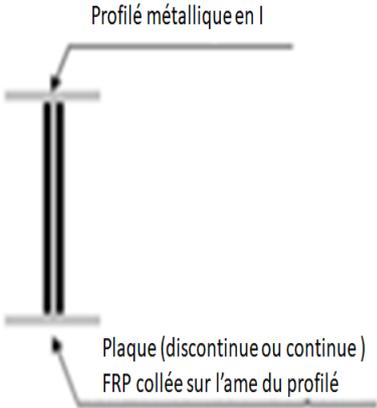
*Figure IV.1 : Comparaison du comportement mécanique de la poutre renforcée et avec celle non renforcée [73].*

### IV.3. Les différents schémas de renforcement d'une poutre métallique en I

En génie civil, les matériaux composites utilisés sont essentiellement des composites carbone-époxyde ou verre-époxyde. Leurs performances mécaniques spécifiques sont en effet supérieures à celles de l'acier, principalement la résistance à la traction et en compression. Ces matériaux se présentent généralement sous la forme de tissus ou de plaques stratifiées. Aujourd'hui, il y a plus de vingt ans après, la recherche s'intensifie dans ce domaine, et les applications de ces matériaux dans le génie civil se diversifient [33].

Le **tableau IV.1** présente les différents schémas de collage de matériaux composites sur une poutre métallique en I travaillant en flexion, chaque schéma est prévu pour un objectif particulier (en flexion et/ou en cisaillement) [7]

Tableau IV.1 : Différents schémas de renforcement d'une poutre métallique en I [7].

Schémas de renforcement	Objectif du schéma de renforcement
	En flexion
	En flexion et cisaillement
	En cisaillement

#### IV.4. Procédure de renforcement des poutres métalliques exemple du pont Pottawattamie

Le pont métallique “Pottawattamie” en état d’Iowa a été construit en 1938. Les travaux de renforcement avec des plaques en CFRP ont été initialisés par département de Iowa et financé par Federal Highway Administration (FHWA). Les **figures (IV.2. a, b, c, d, e et f)** montrent le procédé des travaux de renforcement de ce pont métallique par des plaques en CFRP.



✚ Préparation de la surface (surface des poutres sablées)



✚ Préparation de la surface (nettoyage de la surface de collage avec Acétone)



✚ Procédure d'installation (application primaire)



Procédure d'installation (application de l'adhésive Epoxy)



Procédure d'installation des plaques CFRP



Procédure d'installation achevée

*Figure IV.2 : Exemple de procédé des travaux de renforcement du Pont métallique "Pottawattamie" en état d'Iowa avec des plaques en CFRP [50].*

#### IV.5. Modes de rupture des poutres métalliques renforcées par matériaux composites

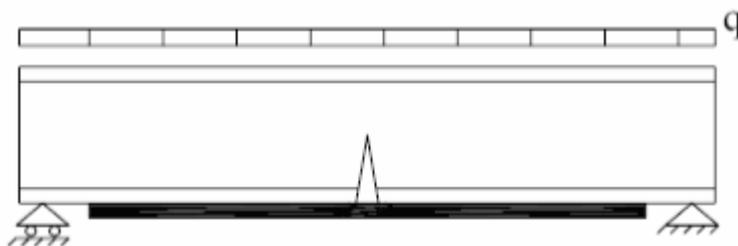
La combinaison des matériaux composites comme renforcement de poutres métalliques produit de nouveaux modes de rupture, ces ruptures peuvent se situer à différents niveaux dans la poutre métallique, dans le composite ou dans l'interface acier composite. Les principaux modes de rupture susceptibles d'être observés dans les poutres métalliques renforcées extérieurement par des plaques en matériaux composites et travaillant en flexion, sont décrits ci-après [18].

##### *IV.5.1. Rupture due à la traction de la poutre métallique ou du composite*

Auparavant, on réalisait quelques éléments métalliques en fer de fonte qui présentait une rupture fragile en traction. Pour ces derniers, le renforcement vise à réduire les contraintes normales produites par les charges permanentes et les surcharges, ceci afin d'augmenter la sécurité contre la rupture sur la face tendue de l'élément métallique.

Concernant les poutres en fer de fonte, l'utilisation du FRP prétendu pourra être particulièrement utile, sinon obligatoire, puisque dans ce cas-là une réduction des contraintes de traction du substrat est réalisée sans réduction préliminaire des contraintes dues aux surcharges [30].

Dans le cas des poutres métalliques à rupture ductile (fer puddlé, acier), le renforcement par matériau composite a pour fonction de réduire les contraintes dans la poutre métallique sous les charges de service (afin d'augmenter la résistance à la fatigue), aussi bien que l'augmentation de la capacité portante ultime de la poutre renforcée. La rupture classique de la poutre métallique dans la zone tendue en sous face et la rupture fragile en tension de la plaque de composite sont représentées par les **figures IV.3 et IV.4**.



*Figure IV.3 : Rupture en tension de la poutre en I [30].*



*Figure IV.4 : Rupture en tension de la plaque composite [30]*

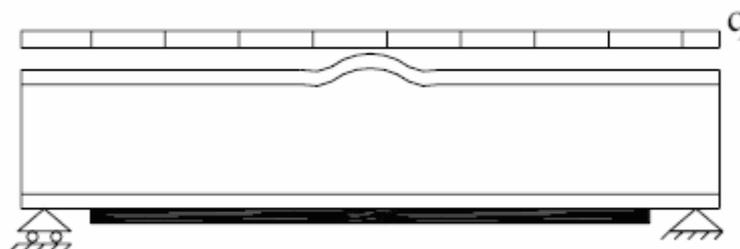
#### **IV.5.2. Rupture due à la compression de la poutre métallique**

Cette rupture, due à la compression de la poutre métallique, se produit avec différents modes selon le type du matériau de substrat et de la géométrie de la section. Quelques métaux, comme le fer de fonte sont caractérisés par la non-linéarité en traction, avec une réduction progressive de la rigidité, contrairement à l'acier [30].

Dans le cas des poutres en acier, les codes modernes de conception, tels que l'Eurocode 3[19] donnent des règles pour établir le type du mode de rupture due à la compression.

Dans le cas celles en fonte ou en fer puddlé, une recherche spécifique est recommandée pour établir le type de mode de rupture due à la compression [30].

La rupture en compression de la poutre métallique (instabilité locale) est représentée par la **figure IV.5**



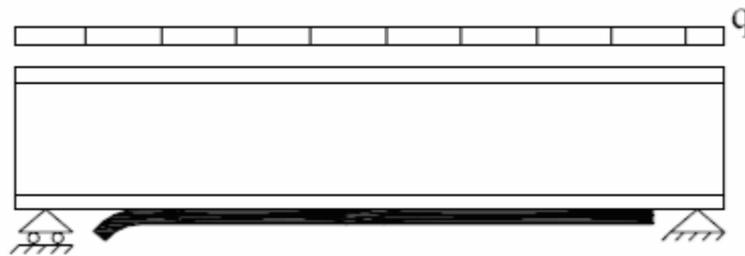
*Figure IV.5 : Instabilité locale par rupture en compression de la poutre en I [30].*

#### **IV.5.3. Rupture due au décollement de la plaque composite de renforcement**

L'analyse de la section composée de la poutre métallique et de la plaque de matériaux composites de renforcement est effectuée dans l'hypothèse d'un collage parfait entre la poutre et la plaque de FRP.

Ce n'est malheureusement pas toujours le cas, car une concentration de fortes contraintes et déformations se produit aux extrémités de l'interface entre la poutre métallique et la plaque FRP, due aux discontinuités géométriques Cette concentration de contrainte est à l'origine de

la rupture par décollement. La rupture par décollement ou délaminage à l'interface entre la poutre métallique et la plaque composite au niveau des extrémités est représentée par la **figure IV.6** [30].



*Figure IV.6 : décollement de la plaque [30].*

#### ***1.5.4. Rupture due au cisaillement aux extrémités de la poutre métallique en I***

Le renforcement en flexion impliquant une augmentation des charges verticales agissantes, il est nécessaire de vérifier la poutre contre le cisaillement et la rupture par instabilité locale proche des appuis. La rupture en cisaillement par instabilité locale de la poutre métallique est représentée par la **figure IV.7** [30].



*Figure IV.7: Rupture en cisaillement [30].*

## **IV.6. Conclusion**

Il existe une documentation de plus en plus abondante sur l'utilisation des matériaux composites pour des applications de génie civil. D'après les renseignements obtenus dans la documentation, plusieurs conclusions peuvent être tirées concernant le renforcement de poutres métalliques en utilisant des matériaux composites. En effet, cette revue des principales recherches effectuées dans ce domaine nous donne plusieurs indications quant aux possibilités d'utilisation des composites. Les matériaux composites qui sont appelés à connaître le plus grand développement dans le domaine de la réhabilitation et du renforcement des structures existantes sont les lamelles à base de fibres de verre ou de fibres de carbone.

## Chapitre V

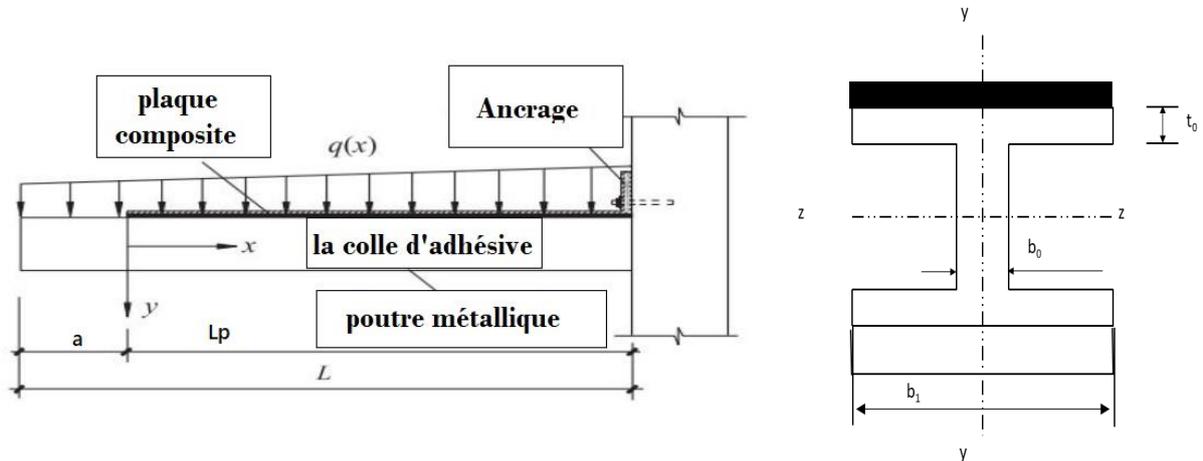
*Analyse mécanique des contraintes  
d'interface d'une poutre console  
métalliques renforcée par matériaux  
composites sous différentes charges  
mécaniques*

## V.1. Introduction

L'utilisation des composites pour le renforcement des poutres et des structures génie civil est une des méthodes récentes de la réhabilitation par composite. Cependant, le mode de rupture le plus important de ces structures renforcées est le décollement de la plaque composite en raison des contraintes d'interfaces élevées à proximité du bord de la plaque. Ces dernières années, plusieurs travaux de recherche ont été effectués sur la méthode de réhabilitation. Smith et Teng [72], Rabahi et al [55], Hassaine Daouadji et al [28], Rabahi et al [54], Benyoucef et al [12], Rabahi et al [56], Hassaine Daouadji et al [27]. Dans la présente recherche. Une méthode améliorée pour le calcul des contraintes d'interface a été développée pour une poutre console métallique renforcée par différents types de composites sous chargement mécanique (charge répartie et charge concentrée à l'extrémité).

## V.2. Analyse théorique

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



*Figure V.1 : Poutre console métallique renforcée par des plaques en matériaux composites.*

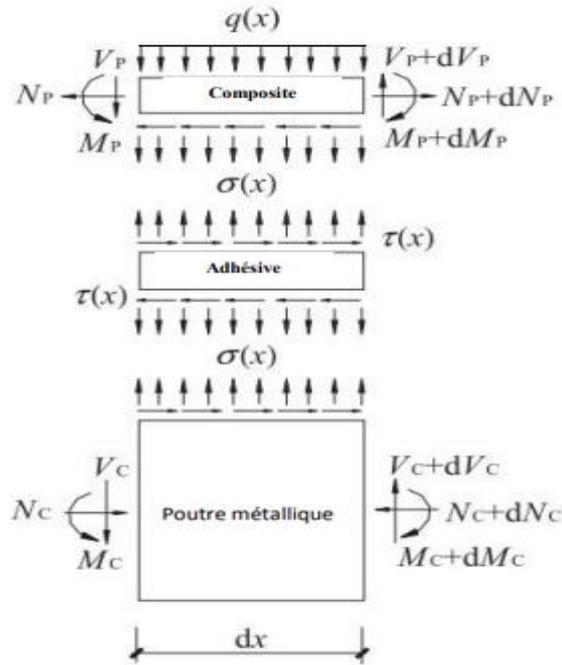


Figure V.2 : Un segment différentiel de la poutre métallique renforcée par collage de composite.

➤ **Equations d'élasticité**

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

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1(x)}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{3G_1} \xi \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (\text{V.1})$$

$$\varepsilon_2(x) = \frac{du_2(x)}{dx} = -\frac{y_2}{E_2 I_2} M_1(x) + \frac{N_2(x)}{E_2 A_2} + \frac{t_2}{3G_2} \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (\text{V.2})$$

Ou  $u_1(x)$  et  $u_2(x)$  sont les déplacements longitudinaux de la poutre métallique et la plaque composite respectivement.  $M_1(x)$  et  $M_2(x)$  sont respectivement les moments de flexion appliqués à la poutre métallique et la plaque composite.

$E_1$  Est le module de Young du d'acier.  $I_1$  le moment d'inertie,  $Y_1$  et  $Y_2$  sont la distance entre la face inférieure de la poutre et la face supérieure de l'adhérent.  $N_1$  et  $N_2$  sont les forces axiales appliquées au poutre et à la plaque composite respectivement.  $A_1$  et  $A_2$  sections transversales.  $G_1$  et  $G_2$  sont les modules de cisaillement transversal des adhérents 1 et 2.  $b_2$  et  $t_2$  sont la largeur et l'épaisseur de la plaque de renforcement.

$\xi$  est un coefficient qui tient compte de la forme géométrique de la section étudiée et est donné par :

$$\xi = \frac{1}{2A_1 t_1^2} \left[ b_1 \left( -t_0^3 + 6t_1^2 t_0 - t_1^3 + (t_1 - t_0)^3 \right) + b_0 \left( 3t_1^2 (t_1 - 2t_0) - (t_1 - t_0)^3 + t_0^3 \right) \right] \quad (\text{V.3})$$

Comme la poutre est une IPE on a :

$$A_1 = 2b_1 t_0 + b_0 (t_1 - 2t_0) \quad (\text{V.4})$$

Et :

$$I_1 = \frac{b_0 (t_1 - 2t_0)^3}{12} + 2 \left[ \frac{b_1 t_0^3}{12} + b_1 t_0 \frac{(t_1 - t_0)^2}{4} \right] \quad (\text{V.5})$$

### ***V.2.1. Distribution des contraintes de cisaillement dans l'interface composite– Acier***

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

$$\tau = k_s [u_2(x) - u_1(x)] \quad (\text{V.6})$$

Où :

$u_1(x)$  et  $u_2(x)$  sont les déplacements longitudinaux à la face inférieure de l'adhérent 1 et la face supérieure de l'adhérent 2 ;

Et :  $K_s = \frac{G_a}{t_a}$  est la rigidité au cisaillement de la couche d'adhésive.

Avec :  $G_a$  et  $t_a$  représentant respectivement le module de cisaillement et l'épaisseur de l'adhésive.

En dérivant l'expression (V.6) nous obtenons :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = k_s \left[ \frac{du_2(x)}{dx} - \frac{du_1(x)}{dx} \right] \quad (\text{V.7})$$

En substituant les équations (V.1) et (V.2) dans l'équation (V.7) nous aurons :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = k_s \left[ -\frac{y_2}{E_2 I_2} M_1(x) + \frac{N_2(x)}{E_2 A_2} + \frac{t_2}{3G_2} \frac{d\tau(x)}{dx} - \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1(x)}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{3G_1} \xi \frac{d\tau(x)}{dx} \right] \quad (\text{V.8})$$

En dérivant l'équation (V.8) une deuxième fois, nous obtenons :

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} = k_s \left[ \frac{-y_2}{E_2 I_2} \frac{dM_2(x)}{dx} + \frac{1}{E_2 A_2} \frac{dN_2(x)}{dx} - \frac{t_2}{3G_2} \frac{d^2\tau(x)}{dx^2} - \frac{y_1}{E_1 I_1} \frac{dM_1(x)}{dx} - \frac{1}{E_1 A_1} \frac{dN_1(x)}{dx} - \frac{t_1}{3G_1} \xi \frac{d^2\tau(x)}{dx^2} \right] \quad (\text{V.9})$$

L'équilibre horizontal donne :

$$\frac{dN_1(x)}{dx} = -b_2 \tau(x) \quad (\text{V.10})$$

$$\frac{dN_2(x)}{dx} = b_2 \tau(x) \quad (\text{V.11})$$

Où :

$$N_2(x) = N(x) = b_2 \int_0^x \tau(x) dx \quad (\text{V.12})$$

$$N_1(x) = -N(x) = -b_2 \int_0^x \tau(x) dx \quad (\text{V.13})$$

Avec :  $b_2$  la largeur de la plaque composite. En supposant que les courbures dans l'adhérent 1 et 2 sont égales, la relation entre les moments dans les deux adhérents peut être écrite comme suit :

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

Avec :

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

L'équilibre de l'élément de la figure V.2 permet d'écrire :

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

Où :  $M_T(x)$  est le moment total appliqué à la poutre hybride (Acier - Composite). Le moment fléchissant dans chaque adhérent est exprimé en fonction du moment total appliqué et de la contrainte de cisaillement à l'interface.

En remplaçant les équations (V.10), (V.11), et (V.14) dans l'équation (V.16), on tire :

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

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

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

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = V_1(x) = \frac{R}{(R+1)} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (\text{V.19})$$

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = V_2(x) = \frac{1}{(R+1)} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (\text{V.20})$$

La substitution des forces de cisaillement des équations (V.19) et (V.20) et les forces axiales des équations (V.12) et (V.13) dans l'équation (V.9) nous donne l'équation différentielle régissant des contraintes de cisaillement d'interface suivante :

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} = k_s \left[ \frac{-y_2}{E_2 I_2} \left( \frac{1}{(R+1)} [V_T(x) - b_2 (y_1 + y_2 + t_a) \tau(x)] \right) + \frac{b_2}{E_2 A_2} \tau(x) \right. \\ \left. - \frac{y_1}{E_1 I_1} \left( \frac{R}{(R+1)} [V_T(x) - b_2 (y_1 + y_2 + t_a) \tau(x)] + \frac{b_2}{E_1 A_1} \tau(x) \right) - K_s \left[ \frac{t_2}{3G_2} + \frac{t_1}{3G_1} \xi \right] \frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} \right] \end{aligned} \quad (\text{V.21})$$

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} - K_1 b_2 \left[ \frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} + \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right] \tau(x) + k_1 \left[ \frac{(y_1 + y_2)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right] V_T(x) = 0 \quad (\text{V.22})$$

Avec:

$$K_1 = \frac{1}{\left[ \frac{t_a}{G_a} + \frac{t_1}{3G_1} + \frac{t_2}{3G_2} \xi \right]} \quad (\text{V.23})$$

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

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sinh(\lambda x) + m_1 V_T(x) \quad (\text{V.24})$$

Où :

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

Et :

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

Il faut noter que  $B_1$  et  $B_2$  sont des constantes d'intégration déterminées à partir des conditions aux limites.

Dans la présente étude une poutre console sollicitée par une charge uniformément répartie et une charge concentrée

### ✚ Cas d'une charge uniformément répartie

La formule de la contrainte de cisaillement est donnée par l'équation suivante :

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

Avec :

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

### ✚ Pour le cas d'une charge concentrée

La formule de la contrainte de cisaillement est donnée par l'équation suivante :

$$\tau(x) = B_5 \cosh(\lambda x) + B_6 \sinh(\lambda x) + m_1 V t(0) \quad (\text{V.29})$$

Avec :

$$B_6 = \frac{-m_1 V t(0)}{\lambda} \quad (\text{V.30})$$

$$B_5 = - \left( B_6 + \frac{m_1 V t(0)}{\cosh(\lambda L)} \right) \quad (\text{V.31})$$

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

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

$$\sigma_n(x) = k_n [w_2(x) - w_1(x)] \quad (\text{V.32})$$

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

$$K_n = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x)} = \frac{\Delta \sigma_n(x)}{\Delta w(x) / t_a} \left( \frac{1}{t_a} \right) = \frac{E_a}{t_a} \quad (\text{V.33})$$

$w_1(x)$  et  $w_2(x)$  sont les déplacements verticaux de l'adhérent 1 et 2 respectivement. En dérivant l'équation (28) deux fois il en résulte :

$$\frac{d\sigma_n(x)}{dx^2} = K_n \left[ \frac{d^2w_2(x)}{dx^2} - \frac{d^2w_1(x)}{dx^2} \right] \quad (\text{V.34})$$

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

$$\frac{d^2w_1(x)}{dx^2} = -\frac{M_1(x)}{E_1I_1} \quad (\text{V.35})$$

$$\frac{d^2w_2(x)}{dx^2} = -\frac{M_2(x)}{E_2I_2} \quad (\text{V.36})$$

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

$$\frac{d^4w_1(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_1I_1}b_2\sigma_n(x) + \frac{y_1}{E_1I_1}b_2\frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_1I_1} \quad (\text{V.37})$$

$$\frac{d^4w_2(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_2I_2}b_2\sigma_n(x) + \frac{y_2}{E_2I_2}b_2\frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_2I_2} \quad (\text{V.38})$$

La substitution des équations (V.37) et (V.38) dans la quatrième dérivée de la contrainte normale obtenue à partir de l'équation (V.32) donne l'équation différentielle régissant la contrainte normale d'interface :

$$\frac{d^4\sigma_n(x)}{dx^4} + K_n \left( \frac{b_2}{E_1I_1} + \frac{b_2}{E_2I_2} \right) \sigma_n(x) - K_n \left( \frac{b_2y_1}{E_1I_1} + \frac{b_2y_2}{E_2I_2} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{qK_n}{E_1I_1} = 0 \quad (\text{V.39})$$

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

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] + e^{\beta x} [C_3 \cos(\beta x) + C_4 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (\text{V.40})$$

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

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [c_1 \cos(\beta x) + c_2 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (\text{V.41})$$

Avec :

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_n}{4} \left( \frac{b_2}{E_1I_1} + \frac{b_2}{E_2I_2} \right)} \quad (\text{V.42})$$

$$n_1 = \left( \frac{E_2 I_2 y_1 - E_1 I_1 y_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \quad (\text{V.43})$$

$$n_2 = \frac{E_2 I_2}{b_2 (E_1 I_1 + E_2 I_2)} \quad (\text{V.44})$$

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

$$c_1 = \frac{K_n}{2\beta^3 E_1 I_1} [V_T(0) + \beta M_T(0)] - \frac{n_3}{2\beta^3} \tau(0) + \frac{n_1}{2\beta^3} \left( \frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \quad (\text{V.45})$$

$$c_2 = -\frac{K_n}{2\beta^2 E_1 I_1} M_T(0) - \frac{n_1}{2\beta^2} \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \quad (\text{V.46})$$

$$n_3 = b_2 K_n \left( \frac{y_1}{E_1 I_1} - \frac{y_2}{E_2 I_2} \right) \quad (\text{V.47})$$

### V.3. Validation du modèle :

Pour cela, une poutre console métallique renforcée par matériaux composites est analysée sous différents chargement mécanique. La poutre, ayant une travée de 1500 mm, une poutre soumise à une charge uniformément répartie d'une valeur de 30 KN/m. et une charge concentrée d'une valeur de 22.5 KN. La longueur de la plaque de renforcement  $L_p$  est de 1000 mm.

La loi de mélange de matériaux composites à base de fibre utilisé dans ce travail :

$$\begin{aligned} E_2 &= E_f V_f + E_m V_m \\ V_f + V_m &= 1 \end{aligned} \quad (\text{V.48})$$

Avec :

$E_2$  : Module de Young de composites (loi de mélange) ;

$E_m$  : Module de Young des matrices ;

$E_f$  : Module de Young des fibres ;

$V_f$  : Fraction volumique des fibres ;

$V_m$  : Fraction volumique des matrices.

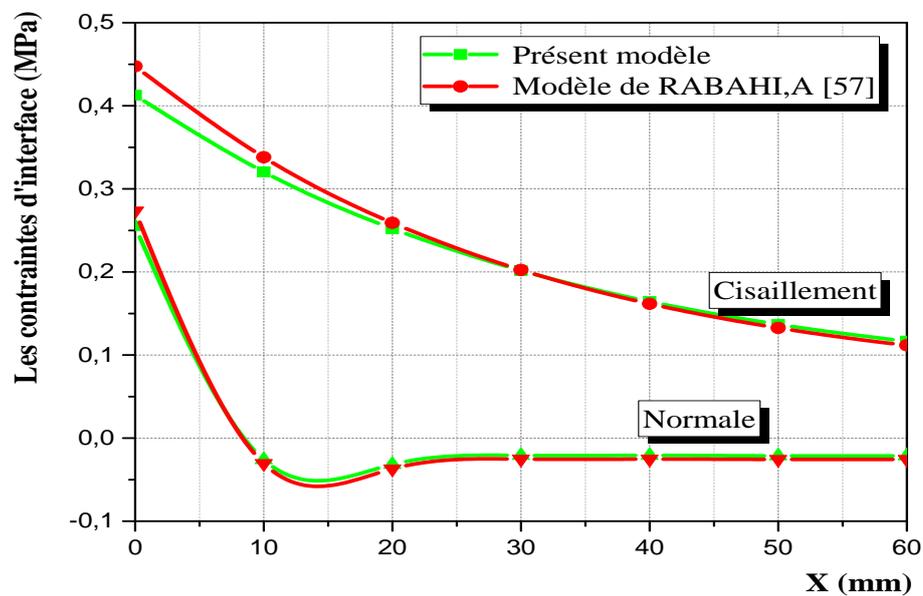
*Tableau V.1 : Propriétés géométriques et mécaniques de la poutre étudié.*

Composante	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Module de Young (MPa)	Coefficient de poisson
<b>IPE 300</b>	$b_1 = 150$ $b_0 = 7.1$	$t_1 = 300$ $t_0 = 10.7$	$E_1 = 210000$	<b>0.3</b>

*Tableau V.2 : Propriétés géométriques et mécaniques de matériaux utilisés*

La présente méthode a été validée en comparant les résultats des contraintes d'interface avec ceux obtenus à partir de la méthode de RABAHI, A [82].

Matériaux composites	Module de Young des fibres $E_f$ (MPa)	Module de Young des matrices $E_m$ (MPa)	Coefficient de poisson ( $\nu$ )	Module de cisaillement $G_2$ (MPa)	Fraction volumique ( $V_f$ )
<b>CFRP</b>	140000	3520	0.28	5000	0.7
<b>GFRP</b>	73000	3520	0.28	5000	0.7
<b>Bore</b>	410000	3520	0.28	5000	0.7
<b>Kevlar</b>	160000	3520	0.28	5000	0.7



*Figure V.3: La comparaison entre la présente méthode et le modèle de RABAHI A [57].*

#### V.4. Etude paramétrique

##### V.4.1. Effet de la longueur (a)

L'effet de la longueur a sur les contraintes d'interface maximales est illustré à la Figure (V.4) et au tableau (V.3). On constate qu'à mesure que la longueur « a » augmente, les contraintes d'interface maximales augmentent significativement.

**Tableau V.3 : L'influence de la longueur (a) sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par différents types de matériaux composites**

Charge répartie								
CFRP		GFRP		Bore		Kevlar		
a(mm)	Contrainte de cisaillement	Contrainte normale						
0	0,0033	0,0022	0,0014	0,0010	0,0132	0,0066	0,0040	0,0025
100	0,0276	0,0174	0,0174	0,0127	0,0607	0,0300	0,0304	0,0187
200	0,0806	0,0503	0,0548	0,0394	0,1538	0,0753	0,0874	0,0530
300	0,1625	0,1009	0,1135	0,0811	0,2925	0,1426	0,1749	0,1054
400	0,2731	0,1690	0,1936	0,1379	0,4767	0,2318	0,2931	0,1761
500	0,4125	0,2547	0,2949	0,2097	0,7066	0,3430	0,4418	0,2649
600	0,5808	0,3581	0,4176	0,2965	0,9820	0,4761	0,6211	0,3718
Charge concentrée								
CFRP		GFRP		Bore		Kevlar		
a(mm)	Contrainte de cisaillement	Contrainte normale						
0	0,0739	0,0485	0,0405	0,0312	0,1853	0,0931	0,0834	0,0529
100	0,2899	0,1806	0,2004	0,1439	0,5272	0,2577	0,3127	0,1891
200	0,5058	0,3127	0,3604	0,2567	0,8691	0,4223	0,5421	0,3254
300	0,7218	0,4449	0,5203	0,3694	1,2111	0,5869	0,7715	0,4617
400	0,9378	0,5770	0,6802	0,4821	1,5530	0,7515	1,0009	0,5979
500	1,1538	0,7091	0,8401	0,5948	1,8950	0,9161	1,2302	0,7342
600	1,3697	0,8412	1,0001	0,7076	2,2369	1,0807	1,4596	0,8704

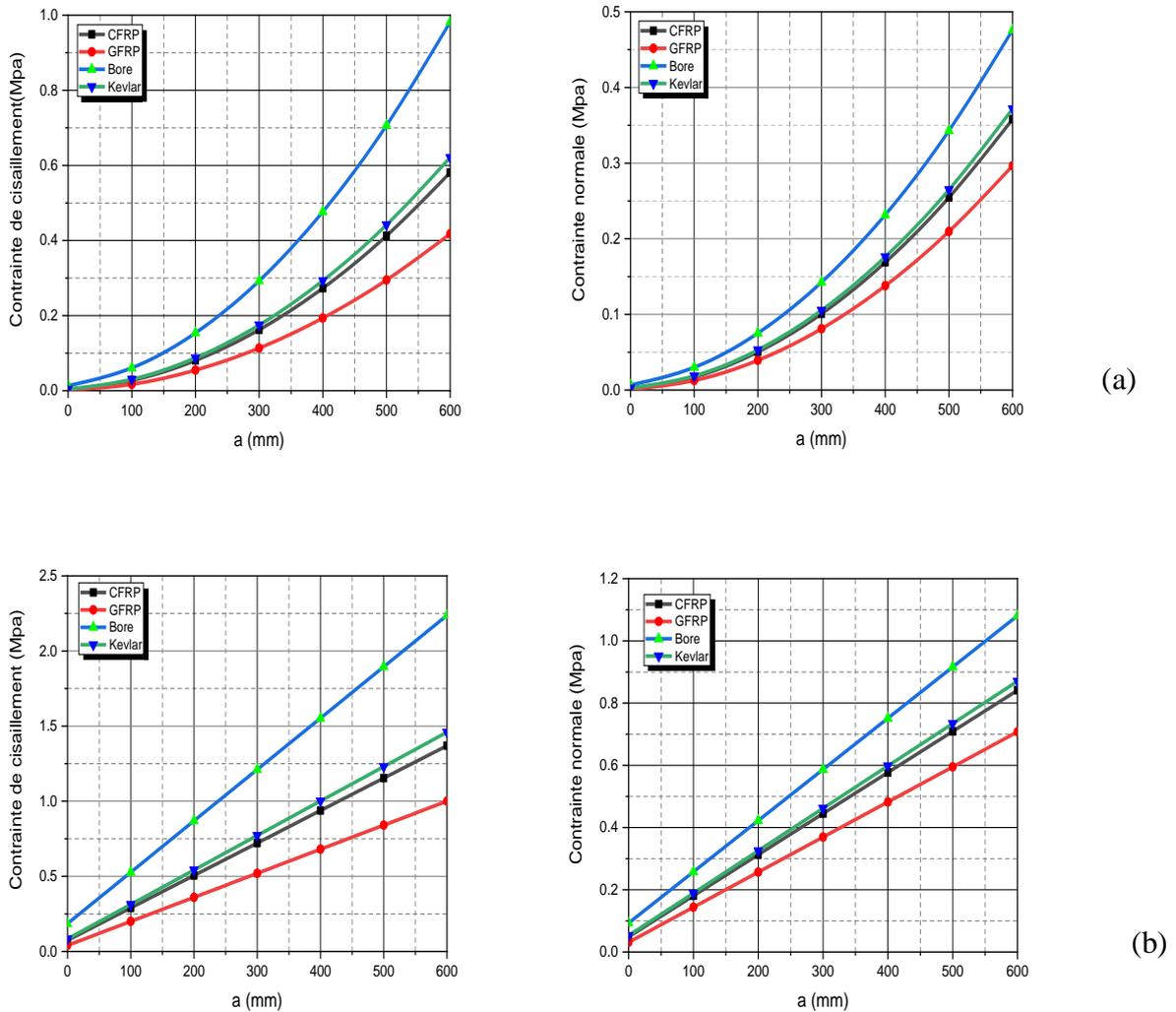


Figure V.4: L'influence de la longueur  $a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par différents types de matériaux composites : (a) charge répartie, (b) charge concentrée à l'extrémité.

#### V.4.2. Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive $t_a$

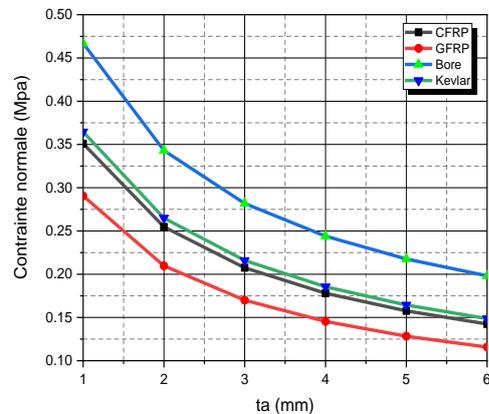
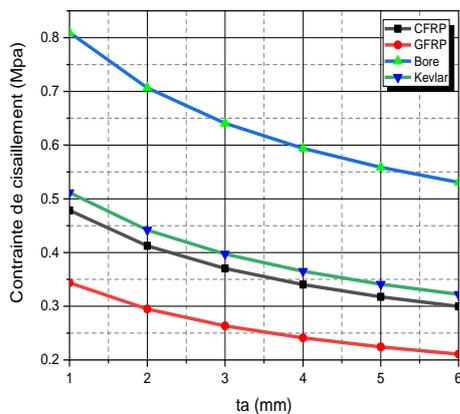
L'effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive «  $t_a$  » sur la variation des contraintes d'interface maximales est présenté sur la figure (V.5) et le tableau (V.4). Lorsque l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésive «  $t_a$  » mène à une réduction significative des contraintes d'interface maximale.

**Tableau V.4 :** Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive  $t_a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par différents types de matériaux composites

Charge répartie								
CFRP		GFRP		Bore		Kevlar		
$t_a$ (mm)	Contrainte de cisaillement	Contrainte normale						
1	0,4784	0,3509	0,3437	0,2905	0,8098	0,4670	0,5116	0,3645
2	0,4125	0,2547	0,2949	0,2097	0,7066	0,3430	0,4418	0,2649
3	0,3703	0,2074	0,2635	0,1700	0,6406	0,2818	0,3971	0,2159
4	0,3403	0,1780	0,2412	0,1454	0,5939	0,2440	0,3652	0,1854
5	0,3176	0,1576	0,2243	0,1283	0,5586	0,2176	0,3411	0,1644
6	0,2996	0,1425	0,2108	0,1157	0,5307	0,1981	0,3221	0,1487

Charge concentrée								
CFRP		GFRP		Bore		Kevlar		
$t_a$ (mm)	Contrainte de cisaillement	Contrainte normale						
1	1,3526	0,9885	0,9873	0,8312	2,2103	1,2706	1,4414	1,0228
2	1,1538	0,7091	0,8401	0,5948	1,8950	0,9161	1,2302	0,7342
3	1,0258	0,5716	0,7454	0,4786	1,6919	0,7413	1,0943	0,5920
4	0,9346	0,4864	0,6780	0,4067	1,5470	0,6329	0,9974	0,5039
5	0,8653	0,4273	0,6267	0,3569	1,4370	0,5576	0,9238	0,4429
6	0,8105	0,3836	0,5861	0,3200	1,3498	0,5019	0,8656	0,3977



(a)

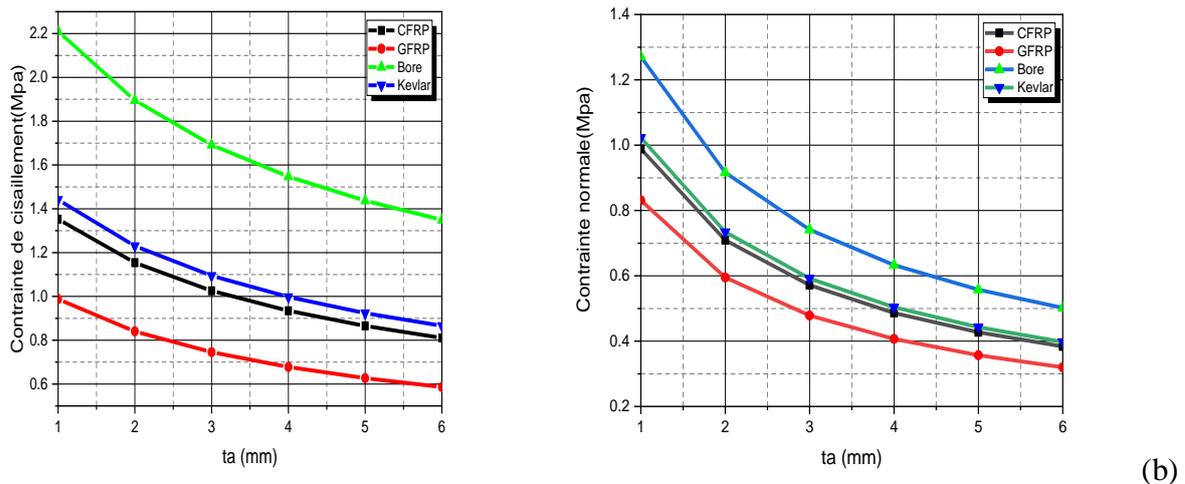


Figure V.5: Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive  $t_a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par différents types de matériaux composites : (a) charge répartie, (b) charge concentrée à l'extrémité.

#### V.4.3. Effet de l'épaisseur de la plaque $t_2$

L'effet de l'épaisseur de la plaque «  $t_2$  » sur la variation des contraintes d'interface maximales est présenté sur la figure (V.6) et le tableau (V.5). Lorsque l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésive «  $t_2$  » mène à une augmentation des contraintes d'interface maximale.

Tableau V.5 : L'influence de l'épaisseur de la plaque composite  $t_2$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par différents types de matériaux composites

$t_2$ (mm)	Charge répartie							
	CFRP		GFRP		Bore		Kevlar	
	Contrainte de cisaillement	Contrainte normale						
0.5	0,1442	0,0534	0,1035	0,0445	0,2513	0,0723	0,1544	0,0554
1	0,2056	0,0901	0,1473	0,0748	0,3594	0,1227	0,2203	0,0936
1.5	0,2529	0,1223	0,1809	0,1012	0,4415	0,1668	0,2710	0,1272
2	0,2926	0,1518	0,2091	0,1254	0,5096	0,2070	0,3136	0,1579
2.5	0,3273	0,1795	0,2338	0,1481	0,5680	0,2442	0,3507	0,1867
3	0,3583	0,2057	0,2560	0,1695	0,6194	0,2790	0,3839	0,2140
3.5	0,3866	0,2307	0,2762	0,1900	0,6652	0,3119	0,4142	0,2399
4	0,4125	0,2547	0,2949	0,2097	0,7066	0,2430	0,4418	0,2649

$t_2$ (mm)	Charge concentrée							
	CFRP		GFRP		Bore		Kevlar	
	Contrainte de cisaillement	Contrainte normale						
0.5	0,4221	0,1561	0,3052	0,1311	0,7237	0,2080	0,4513	0,1618
1	0,5960	0,2606	0,4309	0,2183	1,0175	0,3467	0,6371	0,2702
1.5	0,7272	0,3508	0,5262	0,2937	1,2344	0,4652	0,7772	0,3637
2	0,8357	0,4324	0,6052	0,3620	1,4096	0,5708	0,8927	0,4483
2.5	0,9292	0,5079	0,6738	0,4253	1,5571	0,6671	0,9922	0,5264
3	1,0119	0,5787	0,7347	0,4847	1,6844	0,7560	1,0800	0,5995
3.5	1,0862	0,6456	0,7898	0,5411	1,7960	0,8387	1,1588	0,6686
4	1,1538	0,7091	0,8401	0,5948	1,8950	0,9161	1,2302	0,7342

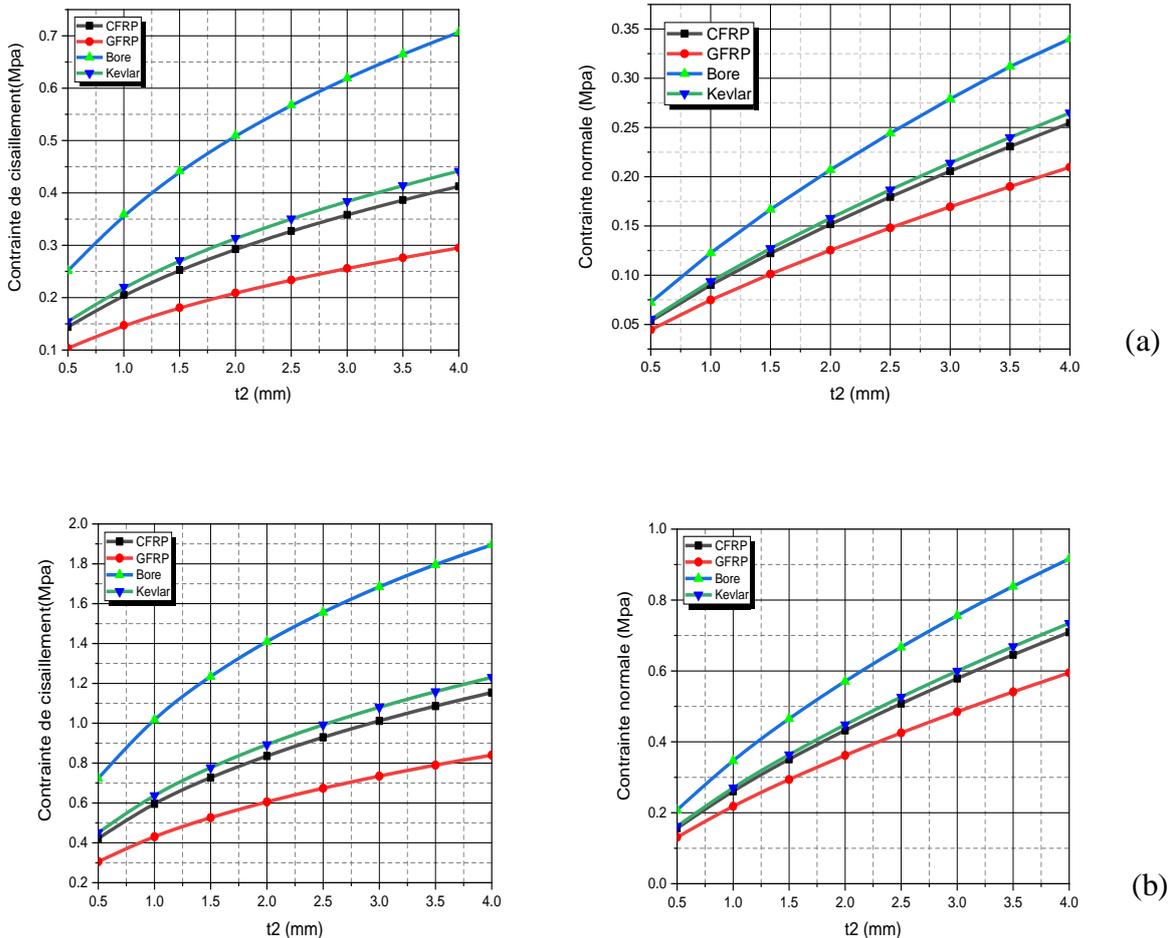


Figure V.6: Effet de l'épaisseur de la plaque  $t_2$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par différents types de matériaux composites : (a) charge répartie, (b) charge concentrée à l'extrémité.

V.4.4. Effet de coefficient de poisson de l'adhésive  $\nu_a$

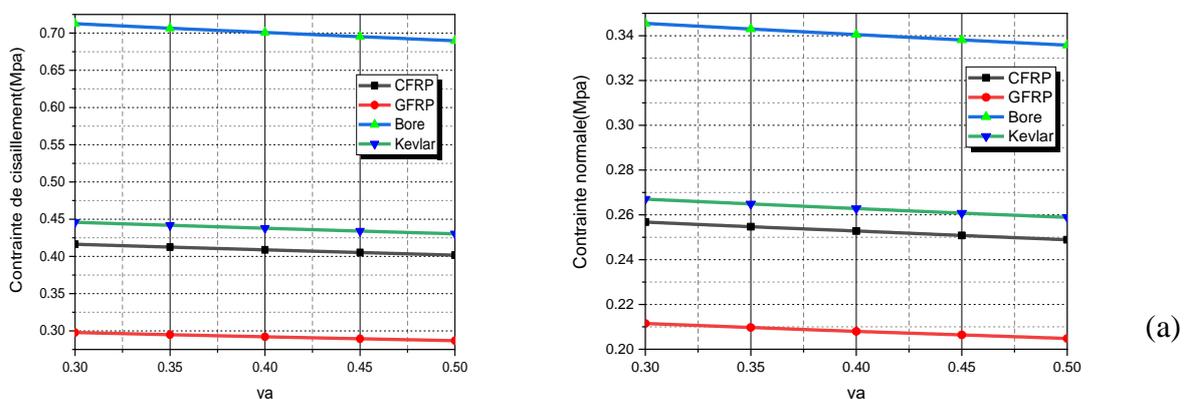
Effet de coefficient de poisson de l'adhésive  $\nu_a$  sur les contraintes d'interface maximales est présentées sur les figure (V.7) et le tableau (V.6). Lorsque l'effet du coefficient de poisson de l'adhésif  $\nu_a$  augmente, les contraintes d'interface maximales diminuent légèrement.

Tableau V.6 : L'influence de coefficient de poisson de l'adhésive  $\nu_a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par différents types de composites

Charge répartie								
	CFRP		GFRP		Bore		Kevlar	
$\nu_a$	Contrainte de cisaillement	Contrainte normale						
0.3	0,4164	0,2568	0,2978	0,2115	0,7127	0,3455	0,4459	0,2670
0.35	0,4125	0,2547	0,2949	0,2097	0,7066	0,3430	0,4418	0,2649
0.4	0,4088	0,2528	0,2921	0,2080	0,7008	0,3405	0,4379	0,2628
0.45	0,4052	0,2508	0,2894	0,2064	0,6952	0,3381	0,4341	0,2608
0.5	0,4017	0,2489	0,2868	0,2048	0,6897	0,3358	0,4303	0,2589

Charge concentrée								
	CFRP		GFRP		Bore		Kevlar	
$\nu_a$	Contrainte de cisaillement	Contrainte normale						
0.3	1,1654	0,7154	0,8488	0,6001	1,9134	0,9240	1,2426	0,7406
0.35	1,1538	0,7091	0,8401	0,5948	1,8950	0,9161	1,2302	0,7342
0.4	1,1425	0,7030	0,8318	0,5897	1,8771	0,9085	1,2183	0,7279
0.45	1,1316	0,6972	0,8237	0,5848	1,8598	0,9011	1,2067	0,7218
0.5	1,1210	0,6914	0,8158	0,5799	1,8430	0,8939	1,1954	0,7159



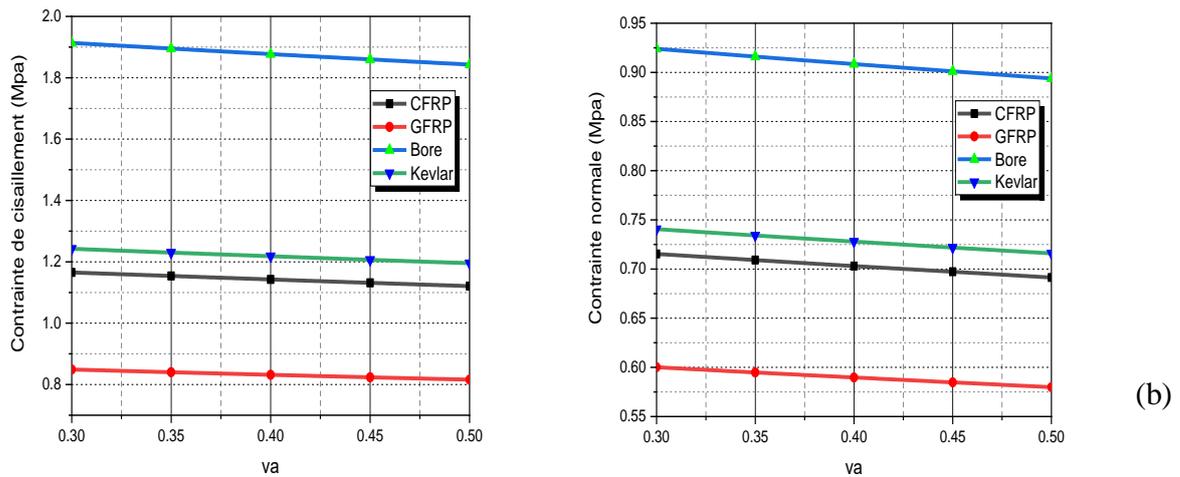


Figure V.7: Effet de coefficient de poisson de l'adhésive  $v_a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par différents types de matériaux composites : (a) charge répartie, (b) charge concentrée à l'extrémité.

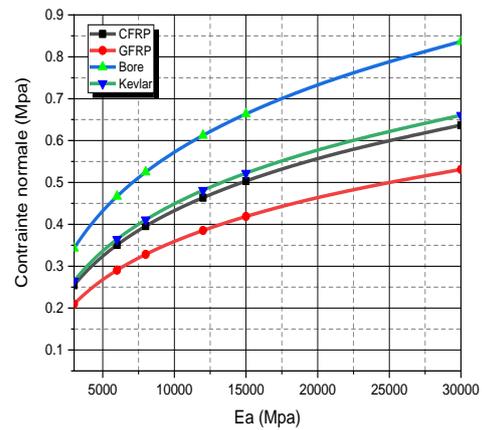
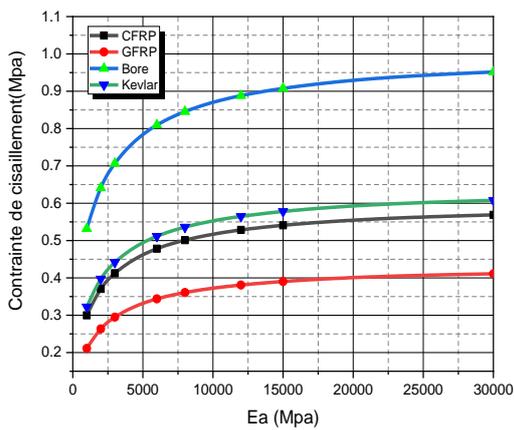
#### V.4.5. Effet de la rigidité de la colle d'adhésive $E_a$

L'effet de la rigidité de la colle «  $E_a$  » sur les contraintes d'interface maximales est présentées sur la figure (V.8) et le tableau (V.7) 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.

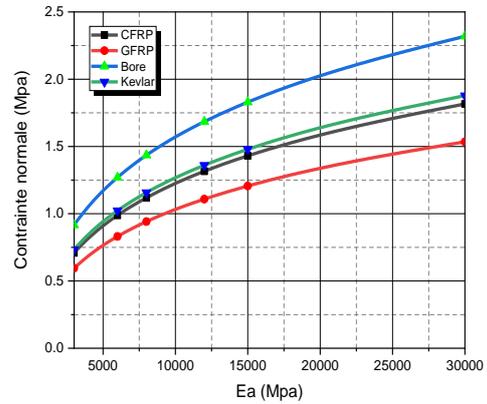
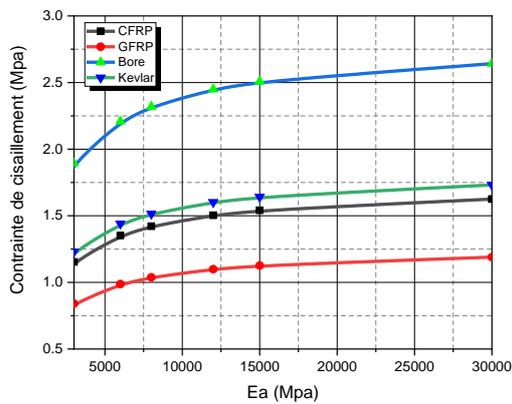
Tableau V.7 : L'influence de la rigidité de la colle d'adhésive  $E_a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par différents types de composites

$E_a$ (MPa)	Charge répartie							
	CFRP		GFRP		Bore		Kevlar	
	Contrainte de cisaillement	Contrainte normale						
<b>1000</b>	0,2998	0,1426	0,2199	0,1158	0,5319	0,1985	0,3224	0,1489
<b>2000</b>	0,3704	0,2074	0,2635	0,1700	0,6410	0,2820	0,3971	0,2159
<b>3000</b>	0,4125	0,2547	0,2949	0,2097	0,7066	0,3430	0,4418	0,2649
<b>6000</b>	0,4782	0,3508	0,3437	0,2905	0,8093	0,4668	0,5115	0,3644
<b>8000</b>	0,5012	0,3958	0,3608	0,3282	0,8455	0,5249	0,5359	0,4109
<b>12000</b>	0,5284	0,4636	0,3810	0,3853	0,8882	0,6124	0,5648	0,4812
<b>15000</b>	0,5408	0,5033	0,3902	0,4186	0,9076	0,6635	0,5779	0,5221
<b>30000</b>	0,5688	0,6369	0,4110	0,5311	0,9516	0,8364	0,6077	0,6604

$E_a$ (MPa)	Charge concentrée							
	CFRP		GFRP		Bore		Kevlar	
	Contrainte de cisaillement	Contrainte normale						
1000	0,8111	0,3839	0,5864	0,3201	1,3524	0,5028	0,8663	0,3980
2000	1,0260	0,5717	0,7455	0,4787	1,6926	0,7417	1,0945	0,5921
3000	1,1538	0,7091	0,8401	0,5948	1,8950	0,9161	1,2302	0,7342
6000	1,3523	0,9883	0,9872	0,8311	2,2093	1,2701	1,4411	1,0226
8000	1,4218	1,1187	1,0386	0,9417	2,3193	1,4353	1,5149	1,1573
12000	1,5039	1,3155	1,0994	1,1087	2,4493	1,6846	1,6021	1,3606
15000	1,5412	1,4302	1,1271	1,2060	2,5084	1,8297	1,6418	1,4790
30000	1,6256	1,8162	1,1895	1,5342	2,6420	2,3188	1,7314	1,8776



(a)



(b)

Figure V.8 : Effet de la rigidité de la colle  $E_a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par composites : (a) charge répartie, (b) charge concentrée.

V.4.6. Effet de la fraction volumique des fibres  $V_f$

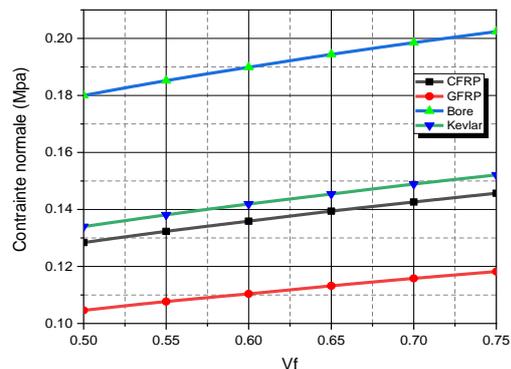
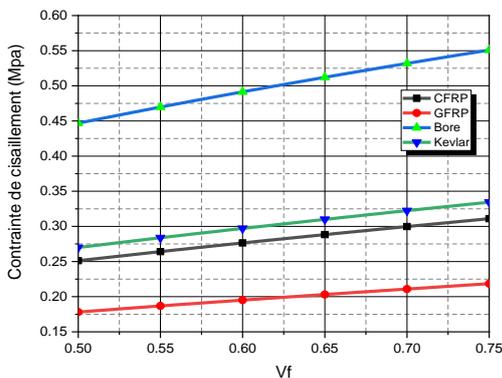
L'effet de la fraction volumique des fibres  $V_f$  sur les contraintes d'interface maximales est présenté sur la figure (V.9) et le tableau (V.8). Lorsque la fraction volumique des fibres  $V_f$  accroisse plus les contraintes d'interface maximales augmentent d'une façon significative.

Tableau V.8: Effet de la fraction volumique des fibres  $V_f$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par différents types de composites

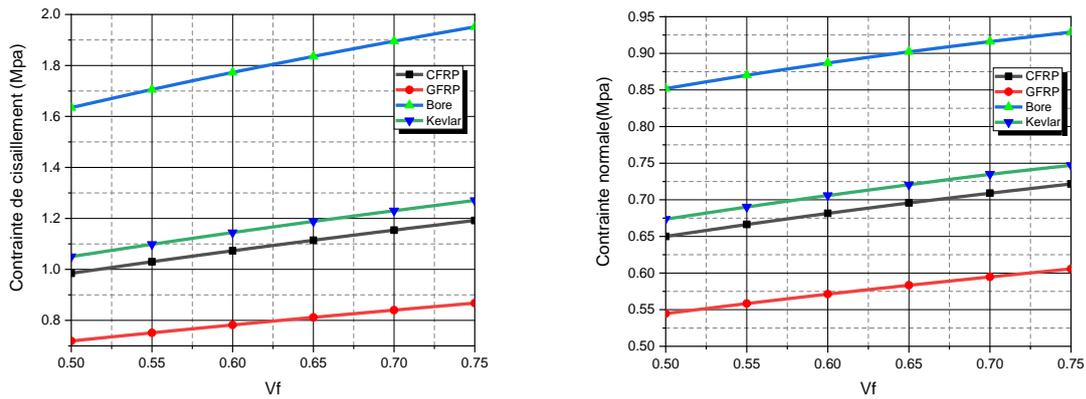
Charge répartie								
	CFRP		GFRP		Bore		Kevlar	
$V_f$	Contrainte de cisaillement	Contrainte normale						
0.5	0,2512	0.1284	0,1781	0.1046	0,4470	0,1800	0,2699	0,1340
0.55	0.2641	0.1323	0.1868	0.1077	0.4698	0.1852	0,2838	0,1381
0.6	0.2764	0.1359	0.1951	0.1104	0.4914	0.1899	0.2971	0.1419
0.65	0.2883	0.1394	0.2031	0.1132	0.5121	0.1944	0.3099	0.1454
0.7	0.2998	0.1426	0.2109	0.1158	0.5319	0.1985	0.3224	0.1489
0.75	0.3110	0.1457	0.2185	0.1182	0.5508	0.2024	0.3344	0.1521

Charge concentrée								
	CFRP		GFRP		Bore		Kevlar	
$V_f$	Contrainte de cisaillement	Contrainte normale						
0.5	0,9847	0,6500	0,7192	0,5447	1,6349	0,8520	1,0502	0,6736
0.55	1,0299	0,6664	0,7513	0,5584	1,7058	0,8703	1,0985	0,6904
0.6	1,0730	0,6816	0,7821	0,5713	1,7725	0,8870	1,1444	0,7060
0.65	1,1142	0,6958	0,8117	0,5834	1,8354	0,9022	1,1882	0,7205
0.7	1,1538	0,7091	0,8401	0,5948	1,8950	0,9161	1,2302	0,7342
0.75	1,1918	0,7217	0,8676	0,6057	1,9514	0,9290	1,2706	0,7470



(a)



(b)

Figure V.9 : Effet de la fraction volumique  $V_f$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console métallique renforcée par composites : (a) charge répartie, (b) charge concentrée.

## V.5.Conclusion

Dans ce chapitre. Le calcul des contraintes d'interface d'une poutre console métallique renforcée par différents types de composite sous un chargement uniformément réparti et sous un chargement concentré à l'extrémité a été présenté par une nouvelle méthode analytique.

L'évaluation de ces contraintes est la base de compréhension du phénomène de décollement qui est le mode de rupture fréquent chez les systèmes renforcés. Les résultats de la présente solution ont été validés par ceux obtenus par le modèle de RABAHI. A [57].

L'étude paramétrique, menée dans ce travail, nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ Les contraintes d'interface maximales (pic) sont observées au bord de la plaque puis diminuent brusquement pour les contraintes d'interface normales et progressivement pour celles du cisaillement, pour atteindre toutes les deux, la valeur de zéro à mi-travée
- ✓ Le maximum des contraintes normales et de cisaillement diminue à mesure que l'épaisseur de la couche l'adhésif ( $t_a$ ) et coefficient de poisson de l'adhésive ( $\nu_a$ )
- ✓ Le maximum des contraintes normales et de cisaillement d'interface augmente avec L'accroissement de la rigidité de la colle ( $E_a$ ) et l'épaisseur de la plaque ( $t_2$ )
- ✓ Prolonger le plus possible la longueur de la plaque de renforcement aux appuis, réduit les contraintes aux bords.
- ✓ Les contraintes d'interface maximales augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des fibres ( $V_f$ )

*Conclusion Générale*  
*et perceptive*

## Conclusion Générale et perceptives

Le contexte général du présent travail représente une contribution à l'étude de la réhabilitation, par renforcement et/ou réparation avec matériaux composites, des structures métalliques endommagées.

Le vieillissement et la dégradation des structures métalliques conséquences des conditions d'environnement agressifs ou d'événements catastrophiques (séisme, choc, ...) sont autant d'éléments qui rendent indispensable la mise au point de solutions de renfort.

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

Dans cette étude, nous avons modélisé les contraintes d'interface acier composite d'une poutre console métallique renforcée par différents types de matériaux composites sous des charges de flexion. Cette recherche confirme et complète certains des points soulevés précédemment à ce sujet.

Les résultats de la présente solution ont été validés par ceux obtenus par le modèle de RABAHI. A [57].

L'étude paramétrique, menée dans ce travail, nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- Les contraintes d'interface maximales (pic) sont observées au bord de la plaque puis diminuent brusquement pour les contraintes d'interface normales et progressivement pour celles du cisaillement, pour atteindre toutes les deux, la valeur de zéro à mi-travée
- Le maximum des contraintes normales et de cisaillement diminue à mesure que l'épaisseur de la couche l'adhésif ( $t_a$ ) et coefficient de poisson de l'adhésive ( $\nu_a$ ).
- Le maximum des contraintes normales et de cisaillement d'interface augmente avec L'accroissement de la rigidité de la colle ( $E_a$ ) et l'épaisseur de la plaque ( $t_2$ ).
- Prolonger le plus possible la longueur de la plaque de renforcement aux appuis, réduit les contraintes aux bords

- Les contraintes d'interface maximales augmentent avec l'augmentation de la fraction volumique des fibres ( $V_f$ ).

Nombreuses sont les perspectives liées à ce sujet et nous ne citons que quelques axes qui pourraient susciter de l'intérêt chez les différents opérateurs :

- ✓ Analyse mécanique d'une poutre console métalliques sous différentes charges mécaniques renforcée par plaque FGM.
- ✓ Développer un code de calcul des poutres métallique renforcées par composite.
- ✓ Faire une étude sur une poutre métallique renforcée en flexion et en cisaillement par différents types de composites sous différentes charges.

## Référence bibliographique

- [1] A. H. FAKIRI, Rénovation et réparation des structures métalliques (cas d'étude à Tlemcen) mémoire de master université de Abou bekr Belkaid Tlemcen, 2015.
- [2] A. H. Manfred and b. rolf, Construction métallique : notions fondamentales et méthodes de dimensionnement, Presses Polytechniques et Universitaires Normandes. P 441- 442. Volume 10, avril 1994.
- [3] A. J. , "Propagation de dommages d'impact dans un matériau composite stratifié à fibres de carbone et résine époxyde," Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 2003.
- [4] ABDELHAK Bousselham , comportement des poutres en béton armé renforcées en cisaillement à l'aide de matériaux composites avancés, Thèse : École De Technologie Supérieure Université Du Québec, 2005.
- [5] AFPS, Le séisme du 21 Mai 2003 en Algérie, Rapport préliminaire de la mission AFPS.
- [6] Ameer Mohammed, Analyse et modélisation des effets de vieillissement , thèse doctorat : Université Djillali Liabes de Sidi Belabbes, 2009.
- [7] Amr Shaat, David Schnerch, Amir Fam, and Sami Rizkalla, Retrofit of Steel Structures Using Fiber Reinforced Polymers (FRP): State-of-the-Art, Nov 2003.
- [8] B. Mohcene , "Réhabilitation et renforcement des poutres au moyen des matériaux composites," Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [9] BC. Metalnord, « Le rivetage à chaud, » 2009. [En ligne]. Available: <https://www.bcmetalnord.com/entreprise/rivetage-a-chaud/>.
- [10] BELABED Youssouf, Etude et analyse du délaminage des structures renforcées par composites FRP multicouches : effet shearlag et impact thermique, Thèse de doctorat LMD: Université Abou Bekr belkaid-Tlemcen, 2019.
- [11] BELBLIDIA Salima, Contribution à l'étude du comportement des poutres métalliques des ouvrages d'art renforcées par différents types de composite. Mémoire de master université de Tiaret, 2018.
- [12] Benyoucef, S., Tounsi, A., Meftah, S.A. and Adda-Bedia, E.A. "Approximate analysis of the interfacial stress concentrations in FRP-RC hybrid beams", Compos. Interf., 13(7), 561 - 571. (2006)
- [13] BENZAID Riad, « Contribution à l'Étude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Éléments Structuraux Linéaires en Béton, » thèse de doctorat, université Constantine, 2010.
- [14] C. ISIS, Innovation en construction le réseau canadien de centres d'excellence sur les innovations en structure avec systèmes de détection intégrés. Volume 7 Numéro 1 2002.

- [15] Caillebaud And C. Jean-Louis, Samuel Forest; Hermes ; Pierreladeveze, Jean-Pierre Pelle, Mécanique Non Linéaire, 2004.
- [16] CGS1.92, « Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique » Recommandations techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages premier semestre 1992.
- [17] Chedad. Abdelbasset « Analyse des contraintes d'interface d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque en FGM ». Mémoire de fin d'étude, Université d'Ibn Khaldoun de Tiaret. .2016
- [18] CNR - DT 202, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction National Research Council, "Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures", Rome, June 2007.
- [19] Cusin F, Tôles collées. Précontraintes additionnelles. Annales de l'ITBTP., 1992.
- [20] F. RIVALIN, Développement d'acier pour gazoducs à haute limite d'élasticité et ténacité élevée : mécanique et mécanismes de la rupture ductile à grande vitesse Thèse de Doctorat Ecole des Mines 1998.
- [21] Feriel Belcadhi, «Soudage de métaux» 2015. Available: <https://www.usinenouvelle.com/expo/guides-d-achat/machines-de-soudage-87>.
- [22] G. Daniel, Matériaux composites, 1997.
- [23] Garden HN, Hollaway. An experimental study of the anchorage length of carbon fiber composite plates used to strengthen reinforced concrete beams. Constr Build Mater 1998 ;12 :203–219.
- [24] Grace N.F., Ragheb W.F., Abdel-Sayed G, Development and application of innovative triaxially braided ductile FRP fabric for strengthening concrete beams. Composite Structures, 2004.
- [25] H. Belhannachi , "Réhabilitation et renforcement des poteaux en béton armé," Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [26] H. QIU, Y. ENOKIM, Y. KAWAGUCHI and T. KISHI, A model for the dynamic fracture toughness of ductile structural stress Eng. Proc. Mech, Vol N05. 2003.
- [27] Hassaine Daouadji T, Abderezak, R. and Rabia, B., "Flexural performance of wooden beams strengthened by composite plate", Struct. Monit. Maintain, 7(3), 233-259. 2020
- [28] Hassaine Daouadji T., Tayeb, B., Abderezak, R. and Tounsi, A., "New approach of composite wooden beam reinforced concrete slab strengthened by external bonding of prestressed composite plate : Analysis and modeling", Struct. Eng. Mech., 78(3), 319-332. 2021
- [29] J. M. Berthelot, Matériaux Composites Comportement mécanique et analyse des structures, 2eme éd., Masson1996, Éd., 2012.

- [30] K, Bouakkaz, Analyse et modélisation par éléments finis du comportement mécanique des poutres métalliques renforcées par collage externe des plaques composites, Thèse de doctorat : Université Djillali Liabes De Sidi Bel Abbes, 2015.
- [31] KHERKHACHE Soumeya, Contribution à l'étude des matériaux composites pour Le confinement externe des colonnes en béton, Mémoire de magister : Université Larbi Ben M'Hidi - Oum-El-Bouaghi.
- [32] L. M, « Etude par spectroscopie RAMN et modélisation d'un Résine composite RTM," thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaid\_Tlemcen, 2010.
- [33] LARBAH Rabah, Analyse mécanique des poutres métalliques renforcées par des plaques composites hybrides, Mémoire de Master : Université Ibn Khaldoun De Tiaret, 2015.
- [34] Llanoos. J, «"La maintenance des ponts routiers, Approche économique" Presse de l'école Nationale des Ponts et Chaussées » 1997.
- [35] Louetri.Latifa, « Etude numérique du renforcement et de la réparation des silos par les matériaux composites » 2016.
- [36] M. Hélice, Matériaux métalliques, phénomène de corrosion, Université d'Evry-Val d'Essonne, Génie des matériaux.
- [37] M. MERAZI, "Analyse mécanique des structures composites : étude comparative entre les différentes théories des plaques," thèse de doctorat, Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbes, 2015.
- [38] M. Touati, "Etude Et Analyse Des Différents Types De Renforcement Dans Les Poutres-Ponts," Thèse Doctorat, Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, 2015.
- [39] MANFERD. H. ROLF BEZ, Construction métallique : Notions fondamentales et méthodes de dimensionnement, Volume10.
- [40] Mécanique des structures et Résistance des Matériaux, (Résumé du cours Résistance des matériaux |Chapitre 7 : Flambement).
- [41] Métal, Réparation et rénovation des structures métalliques, 2014.
- [42] N. BOUMECHRA, Control des constructions métalliques cours master1 génie civil option construction métallique, 2011.
- [43] N. KOUIDER 2010, Analyse d'éléments de structure métallique à réhabiliter, thèse de magistère de l'université Annaba. 2010.
- [44] N. R.R, "COMPOSITE MATERIALS - HISTORY, TYPES, FABRICATION," International Journal of Mechanical And Production Engineering, vol. 5, no. 9, 2017.

- [45] N. Simon, Durabilité de la protection anticorrosion par galvanisation des Structures métalliques. Projet interdisciplinaire à option ENAC Master Génie Civil semestre 2<sup>É</sup>cole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Juin 2013.
- [46] P. Hamelin, « Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites ». Techniques de l'ingénieur, traité plastique et composite, 2002.
- [47] P. J. Heffernan and M. A. Erki, Equivalent Capacity and Efficiency of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Plastic Sheets, Canadian Journal of Civil Engineering, n° 23, p. 21-29. 1996.
- [48] P. Karkanis , I. Partridge and D. Attwood , Modeling the Cure of a Commercial Epoxy Resin for Applications in Resin Transfer Moulding, vol. 41, Polymer International, 1996.
- [49] Perrier R. et al, Ouvrages d'art utilisant des matériaux composites". IREX, (6), 1996.
- [50] Phares. B. M., Wipf, F. T. J. Klaiber. W., Abu-Hawash. A., Lee. Y. S., Strengthening of Steel Girder Bridges Using Fiber Reinforced Polymer (FRP), Bridge Engineering Center, Iowa State Université.
- [51] P. BOUILLARD, Instabilités, Université libre de BREUXELLES, 2002.
- [52] R. EL HOUSSAIN, "contribution à l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton armé renforcées par matériaux composites," thèse de doctorat, L'université Claude Bernard - Lyon 1, 2004.
- [53] R. Khadija And D. R. Driss, Diagnostique Et Reparation Des Structures Metalliques. Département de Génie Civil. Université des Sciences et Technologie d'Oran (USTO) ,2008.
- [54] RABAHI, A, Daouadji, T.H., Rabia, B. and Belkacem, A. "Nonlinear analysis of damaged RC beams strengthened with glass fiber reinforced polymer plate under symmetric loads", Earthq. Struct.,15(2), 113-122. 2018.
- [55] RABAHI. A, Daouadji, T.H. and Rabia, B. "Aluminum beam reinforced by externally bonded composite materials", Advan. Mater. Res., 10(1), 23. 2021.
- [56] RABAHI. A, Daouadji, T.H. and Rabia, B. "Analysis of interfacial stresses of the reinforced concrete foundation beams repairing with composite materials plate", Coupled Syst. Mech., 9(5), 473-498. 2020.
- [57] RABAHI. A, Daouadji, T.H., Rabia and Tounsi. A, "New proposal for flexural strengthening of a continuous I-steel beam using FRP laminate under thermo-mechanical loading", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 78, No. 6 (2021) 703-714.
- [58] Riad BENZAID, Contribution à l'étude des matériaux composite dans le renforcement et la réparation des éléments structuraux linéaires en béton ». Thèse Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [59] S. F, « Elaboration et caractérisation des matériaux composites à fibres végétales," thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2014.

- [60] S. GASMI, "Elaboration et caractérisation d'un matériau composite renforcé par les fibres de paille de blé," Mémoire présenté pour l'obtention, Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2020.
- [61] S. HATAB, "Maintenance et réhabilitation des structures par matériaux composites," mémoire de magister, Université Mohamed Cherif Messaadia de Souk-Ahras, 2016.
- [62] S. Kaskas , "Etude De L'effet Du Cisaillement Transverse Sur Le Comportement Mécanique De Poutres Composites," Memoire Magister, Universite Mentouri – Constantine, 2010.
- [63] S. M. JOHNSON, Dégradation, Entretien et réparation des ouvrages Traduit Michel LONDEZ Eyrolles,1969.
- [64] S. Mekideche , "Valorisation des déchets comme constituants des Bio-composites," Mémoire de Mastère, Université de M'sila, 2018.
- [65] S. Tadjedit, Université Mohamed Boudiaf d'Oran, 2014.
- [66] S. Yahiaoui , "Etude expérimentale de la durabilité des éléments fissures en béton armé rigidifiés par les matériaux composites," Mémoire de magister, Université M'hamed Bougara de Boumerdes , 2006.
- [67] Saadatmanesh H., Ehsani M.R., Flexural Strength of Externally Reinforced Concrete Beams. Proceedings of the First Materials Engineering Congress. ASCE, Denver, Colorado., pp: 343-355. 1990.
- [68] Samir BRAIRI, « Analyse De La Dégradation Des Structures Fgm Renforcées Par Frp Précontraints, » Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 2019.
- [69] Samuel Tan, AlbolhassanAstaneh-Asl., Cable-Based Retrofit of Steel Building Floors to Prevent Progressive Collapse, Department of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, University of California at Berkeley, Report number : UCB/CEE-STEEL, 2003.
- [70] SIDNEY M. JOHNSON, " Dégradation, entretien et réparation des ouvrages du génie civil", Editions Eyrolles, 1969.
- [71] sika, <http://www.sika.com>.
- [72] Smith, S.T. and Teng, J.G. "Interfacial stresses in plated beams", Eng. Struct., 23(7), 857-871. 2001.
- [73] TEKILI Sabiha, Comportement sous sollicitations dynamiques des structures renforcées par matériaux composites, Thèse : Université Badji Mokhtar – ANNABA, 2017.
- [74] Toufik Achour, étude des techniques de réparation des structures composites endommagées, mémoire de magister, Université mentouri constantine,8-20. 2011.

[75] Z. Boutaraa, Pathologies et réhabilitation des ponts, Master Travaux Publics –Spécialité : Voies et Ouvrages d’Art, Université Hassiba Benbouali de chlef, 2019.

[76] Zhelyazov, "Renforcement des structures en béton arme par collage de matériaux composites" Thèse en cotutelle de doctorat Université de Reims, 2008.