



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 :

AOUIOUAT Mustapha Abdelhamid

YAHMI Zineb

Sujet du mémoire

***Renforcement des poutres métalliques par composites type
FGM poreux : effet de la forme de distribution***

Soutenu publiquement le 17 septembre 2020 devant le jury composé de :

Mr,	N. KERROUM	Président
Mr,	A. RABAHI	Rapporteur
Mr,	A. KRIM	Examineur
Mr,	B. DJEBLI	Examineur

Remerciements

Grâce à Allah tout puissant seigneur du monde clément et miséricordieux ce travail a été réalisé. Je remercie Allah pour m'avoir accordé la santé, le courage et la force nécessaire pour arriver à ce niveau.

Aux termes de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Mon encadreur monsieur RABAHI.Abderezak, pour son soutien moral, pour sa confiance, pour les conseils judicieux qu'il m'a généreusement donnés et la passion de la recherche qu'il m'a transmis. Son extrême générosité, Sa compétence, Son dévouement et son souci constant de l'excellence susciteront toujours mon respect et mon admiration. Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie en premier lieu cette modeste recherche à mon cher père (Amar) et ma chère mère (Karima), Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive. À ma grand-mère Tourkia Ce travail est pour moi le fruit de tes prières. À mon défunt grand père El-Hadj Benamor Saidi que son âme repose en paix. Une spéciale dédicace à mon chère frère, mon bras droit Aimen et mon petit frère Islèm et mes chères sœurs Bochra et Noor sans oublier mes chères Manel et Ahlem et fatima et Hayet qui ont été toujours là pour moi, qui m'ont beaucoup aider et encourager tous les temps et mon meilleur copain Khaled hella et ma chère cousine marwa. À mes meilleurs amis Noureddine et Abdou et Belaid. La vie m'a fait un très beau cadeau ; la famille Saidi pour mes oncles Dahmane saidi et Abdelkrim.

AOUIOUAT Mustapha

Ce travail modeste est dédié :

À mes chers parents

À tous les proches de la famille « yahmi », et plus Particulièrement, mes sœurs et mes frères et mes amies hanane houda, chaima khaoula sabrina bochra.

YAHMI Zineb

Sommaire

Liste des tableaux.....	V
Liste des figures	VI
Résumé.....	XI
Abstract	XII
ملخص.....	XIII
Introduction générale	XIV

Chapitre 1: 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	2
I.2.2. Erreurs matérielles	2
I.2.2.1 Au bureau d'études	2
I.2.2.2. À l'atelier	2
I.2.2.3. Erreur d'échantillonnage.....	3
I.2.2.4. Au chantier.....	3
I.2.2.5. Causes accidentelles.....	4
I.2.2.6. Actions excessives de type normal	4
I.2.3. Actions anormales.....	4
I.2.4 Ignorance.....	5
I.2.5. Au niveau du projet.....	5
I.2.5.1. Absence ou insuffisance du cahier des charges	5
I.2.5.2. Méconnaissance des règlements	5
I.2.5.3. Méconnaissance des outils informatiques.....	5
I.2.5.4. Erreurs sur les actions	5
I.2.5.5. Au niveau de l'exécution	6

I.2.6. Au niveau du montage	6
I.2.6.1. Manque de coordination entre les intervenants:	6
I.2.6.2. Méconnaissance de la mise en œuvre	6
I.2.7. Erreurs de conception ou d'études:.....	6
I.2.7.1. Poutres à treillis.....	6
I.2.7.2. Défauts des soudures.....	10
I.2.7.3. Corrosion.....	14
I.2.7.4 La Fatigue	17
I.2.7.5. Vieillessement par redistribution d'efforts	18
I.3 Conclusion	19
 <u>Chapitre II: Techniques de réparation et renforcement des structures métalliques</u>	
II.1 Introduction	21
II.2 Techniques de réparation et renforcement des structures métalliques	21
II.2.1. Assurer la propreté de l'ouvrage	21
II.2.2. La peinture.....	22
II.2.3. Le zingage.....	22
II.2.4. Le placage.....	22
II.2.5. Influence des détails de construction.....	23
II.2.6. Gainage.....	24
II.2.7. Réparation par soudage, boulonnage.....	25
II.2.8. Réparation par rivetage.....	26
II.2.9. Renforcement par collage de plats métalliques	27
II.2.10. La technique de précontrainte additionnelle.....	27
II.2.11. Renforcement par collage de plats composites.....	28
II.2.12. Addition d'éléments structurels complémentaires	29
II.2.13. Les différents schémas de renforcement d'une poutre métallique en I	30

II.3. Conclusion	32
<u>Chapitre III: Généralité sur les matériaux composites</u>	
III.1. Introduction	34
III.2. Définition du matériau composite	34
III.2.1. La matrice.....	35
III.2.1.1. Les matrices minérales	35
III.2.1.2. Les matrices organiques	36
III.2.2 Le renfort.....	39
III.2.2.1 Fibres.....	39
III.3. Avantages et inconvénients de matériaux composites.....	42
III.4. Domaine d'utilisation de composite dans le domaine de génie civil.....	42
III.4.1. Renforcement par composites collés (plats et tissus).....	42
III.5. Le matériau utilisé pour la présente recherche (FGM)	44
III.5.1. Définition du FGM.....	44
III.5.2 Domaine d'utilisation.....	45
III.5.3. Les différentes lois de mélange du FGM	46
III.5.3.1. Fonction puissance P-FGM.....	47
III.5.3.2. Fonction exponentielle E-FGM.....	48
III.5.3.3. Fonction sigmoïde S-FGM.....	49
III.6. Conclusion.....	50
<u>Chapitre IV: Analyse et modélisation des contraintes d'interface pour une poutre métallique renforcée par FGM poreux: effet de la porosité</u>	
IV.1. Introduction.....	52
IV.2. Analyse	52
IV.2.1. Equations d'élasticité	54
IV.2.2. La distribution des contraintes de cisaillement dans l'interface composite – Acier	55
IV.2.3. La distribution des contraintes normales dans l'interface composite – Acier	57

IV.3. Conclusion	59
------------------------	----

Chapitre V: Résultats et Discussions

V.1. Introduction	61
V.2. Présentation du modèle	61
V.2.1. Validation du modèle	62
V.3. forme de distribution de la porosité.....	63
V.3.1. Distribution linéaire.....	63
V.3.1.1. Effet d'indice de porosité α	63
V.3.1.2. Effet de l'indice de puissance K	64
V.3.1.3. Effet de l'épaisseur de la colle t_a	65
V.3.1.4. Effet de la longueur a	66
V.3.1.5. Effet de la rigidité de l'adhésive E_a	67
V.3.2. Distribution non-linéaire	68
V.3.2.1. Effet d'indice de porosité α	69
V.3.2.2. Effet de l'indice de puissance K	69
V.3.2.3. Effet de l'épaisseur de la colle t_a	70
V.3.2.4. Effet de la longueur a	71
V.3.2.5. Effet de la rigidité de l'adhésive E_a	72
V.4. Conclusion.....	73
Conclusion générale	76
Référence bibliographique	

Liste des tableaux

Tableau I.1: Typologie des développements de la corrosion	15
Tableau II. 1 : Différents schémas de renforcement d'une poutre métallique en I.....	31
Tableau.III.1: donne une comparaison entre les différentes résines.....	38
Tableau.III.2 : Différents types de fibres de verre.....	40
Tableau V.1: Propriétés géométriques et mécaniques des matériaux.	61
Tableau V.2 : chargement et géométrie.	61
Tableau V.3 : Différentes formes de distribution linéaire de la porosité.....	63
Tableau V.4 : Effet de l'indice de puissance K sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme linéaire).	64
Tableau V.5 : Effet de l'épaisseur de la colle t_a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme linéaire).	65
Tableau V.6 : Effet de la longueur a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme linéaire).	66
Tableau V.7 : Effet de la rigidité de la colle E_a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme linéaire).	67
Tableau V.8 : Différentes formes de distribution non linéaire de la porosité.....	68
Tableau V.9 : Effet de l'indice de puissance K sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme non-linéaire).	70
Tableau V.10 : Effet de l'épaisseur de la colle t_a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme non-linéaire).	71
Tableau V.11 : Effet de la longueur a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme non-linéaire).	72
Tableau V.12: Effet de la rigidité de la colle E_a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme non-linéaire).	73

Liste des figures

<i>Figure I.1: La limite d'élasticité en fonction de l'épaisseur de l'acier.....</i>	3
<i>Figure I.2: classe de qualité des vis</i>	4
<i>Figure I.3 : Poutre à treillis</i>	7
<i>Figure I.4: Flambement de goussets</i>	7
<i>Figure I.5: Phénomène de flambement</i>	8
<i>Figure I.6 : Phénomène de voilement.....</i>	9
<i>Figure I.7 : Phénomène de voilement total de l'âme</i>	9
<i>Figure I.8: Voilement local de la membrure de l'âme supérieure</i>	9
<i>Figure I.9 : Phénomène de déversement des poutres.....</i>	10
<i>Figure I.10 : Fissuration à chaud</i>	10
<i>Figure I.11 : Arrachement lamellaire</i>	11
<i>Figure I.12 : Fissuration à froid</i>	11
<i>Figure I.13 : Efforts qui exercent dans un assemblage.....</i>	12
<i>Figure I.14 : Différence entre un boulon pas assez serré et trop serré</i>	13
<i>Figure I.15 : Ovalisation du trou lors du glissement de la pièce.....</i>	14
<i>Figure I.16 : Potentiel standard de quelques couples oxydo-réducteurs qui nous intéressent dans cette étude</i>	16
<i>Figure I.17 : Diagramme potentiel-pH (diagramme de Pourbaix) du fer</i>	17
<i>Figure I.18: Familles de courbes de Wölher.....</i>	18
<i>Figure II.1 : Décapage à l'eau.....</i>	22
<i>Figure II.2 : Exemple de la mise en place de plaques de renfort d'un élément de cornières. 23</i>	23
<i>Figure II.3 : Détails de mise en place de renforts de poutre à larges ailes.....</i>	23
<i>Figure II.4 : Soudage à l'arc avec fil fourré.....</i>	25
<i>Figure II.5 : Rivet constitution d'un assemblage.....</i>	26
<i>Figure II.6 : Pose d'un rivet à tête ronde et gougeage de la tête de rivet.</i>	26

Figure II.7 : Renforcement par plats métalliques	27
Figure II.8: Principe de renforcement par précontrainte additionnelle.....	28
Figure II.9: Différentes méthodes de renforcement par le collage de plaques en composites	29
Figure II.10 : Renforcement d'un portique par une triangulation excentrée.	29
Figure II.11 : Renforcement d'un plancher en portique plan par triangulation.	30
Figure II. 12 : Tablier de pont renforcer par matériaux composites.....	30
Figure III.1: Matériau composite.	34
Figure III.2: Les différents types des matrices	35
Figure III.3: Résines thermoplastiques.....	36
Figure III.4 : Exemples d'élastomère	38
Figure III.5 : Fibre de verre.	40
Figure III.6: Fibre de carbone.....	41
Figure III.7: Tissue en fibre d'aramide (Kevlar).....	41
Figure III.8: Différents types de composite : (a) tissu de fibre de verre ; (b) deux feuillets de fibre de carbone ; (c) plat préfabriqué en fibre de carbone.....	43
Figure III.9: Principales applications industrielles de renforts composites selon la technique EBR (External Bonded Reinforcements) poteau (confinement), renfort de poutre en flexion, et à l'effort tranchant.	44
Figure III.10 : Variation continue des propriétés d'un matériau FGM.	45
Figure III.11: Géométrie d'une plaque FGM.....	46
Figure III.12 : Variation de la fraction volumique dans une plaque P-FGM.	48
Figure III.13 : Variation du module de young dans une plaque E-FGM.	49
Figure III.14: Variation de la fraction volumique dans une plaque S-FGM.....	50
Figure IV.1 : Poutre métallique en I simplement appuyée renforcée par une plaque composite.....	53
Figure IV.2 : Un segment différentiel de la poutre métallique renforcée par collage de composite.....	53

Figure V.1 : Validation de la présente méthode en comparant avec celle de Ameer. 62

Figure V.2: Effet d'indice de porosité α sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme linéaire). 64

Figure V.3 : Effet de l'indice de puissance K sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme linéaire). 65

Figure V.4 : Effet de l'épaisseur de la colle t_a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme linéaire). 66

Figure V.5 : Effet de la longueur a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme linéaire). 67

Figure V.6 : Effet de la rigidité de la colle E_a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme linéaire). 68

Figure V.7: Effet d'indice de porosité α sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme non-linéaire). 69

Figure V.8 : Effet de l'indice de puissance K sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme non-linéaire). 70

Figure V.9: Effet de l'épaisseur de la colle t_a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme non-linéaire). 71

Figure V.10 : Effet de la longueur a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme non-linéaire). 72

Figure V.11: Effet de la rigidité de la colle E_a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme non-linéaire). 73

Liste des notations

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

A : Aire de la section de la poutre métallique.

$[A]$: Matrice de membrane.

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

A'_{11} : Est le premier terme de la matrice inverse de la matrice de membrane.

α : Indice de la porosité.

B : Coefficients de rigidité de la poutre.

$[B]$: Matrice de couplage flexion –membrane.

b_0 : Est l'épaisseur de l'âme du profilé en I.

b_1 et b_2 : Largeur de la poutre métallique et de la plaque de renforcement respectivement.

C_1 et C_2 , C_3 , C_4 : Constantes d'intégration déterminées par les conditions aux limites.

$[D]$: Matrice de flexion.

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

D'_{11} : Est le premier terme de la matrice inverse de la matrice de flexion.

$E(z)$: Module de Young de la plaque.

E_1 et E_2 : Module d'élasticité de la poutre métallique et de la plaque composite

E_a : Module de Young de l'adhésif.

E_c : Module de Young de la surface supérieur de la plaque FGM « céramique ».

E_m : Module de Young de la surface inférieure de la plaque FGM « métal ».

G_1 et G_2 : Module de cisaillement de la poutre métallique et de la plaque composite (FGM).

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

h : Epaisseur de la poutre [mm].

I_1 : Moment d'inertie de la section de la poutre métallique.

k : Est un indice de degré d'homogénéité.

K : L'indice de puissance.

K_s : Rigidité tangentielle de l'adhésif.

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

L : Longueur de la poutre.

L_P : Longueur de la plaque de renforcement.

$M(x)$: Moment fléchissant.

$M_1(x)$ et $M_2(x)$: les moments de flexion appliqués à la poutre métallique et la plaque FGM.

$M_T(x)$: Moment total appliqué.

N_i ($i=1, 2$) : Force longitudinale pour l'adhérent "i".

$N_1(x)$ et $N_2(x)$: les forces axiales d'acier et de la plaque composite respectivement.

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

P_i : Propriété mécanique du constituant.

q : Charge répartie.

R : Coefficient de proportionnalité.

t_0 : Epaisseur de la semelle du profilé en I.

t_1 : Hauteur de la poutre métallique.

t_2 : Epaisseur de la plaque composite.

t_a : Epaisseur de l'adhésif.

$U_1^N(x, y)$: Déplacement longitudinal dans la poutre renforcée induit par force longitudinale.

u_1 : Déplacement longitudinal à la base de la poutre métallique.

u_2 : Déplacement longitudinal à la partie supérieur de la plaque composite.

$\Delta u(x)$ Est le déplacement relatif à l'interface de l'adhésif.

$V(x)$: Effort tranchant.

$V_1(x)$ et $V_2(x)$: Effort tranchant applique dans la poutre métallique et dans la plaque composite.

V_i : Fraction volumique du constituant.

$V(z)$: Fraction volumique locale

ν : Coefficient de Poisson.

$w_1(x)$ et $w_2(x)$:Sont les déplacements verticaux de la poutre métallique et de la plaque composite.

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

y_1 et y_2 : sont les distances entre la face inferieure de l'adhérent 1 et la face supérieure de l'adhérent 2 et leurs centres de gravite respectifs.

ε_1 : Déformation de la poutre métallique.

ε_2 : Déformation de la plaque composite (FGM).

σ_n : Contrainte normale dans l'adhésif.

τ_a : Contrainte de cisaillement dans l'adhésif.

ξ : Est un coefficient qui tient compte de la forme géométrique de la section étudiée.

$m_1, m_2, \beta, \lambda, n_1, n_2, n_3$: paramètres définis par les équations en fonction de la méthode exposée ou développée.

Résumé

L'endommagement prématuré des éléments de structures métalliques nécessite un renforcement ou une réparation. Parmi les techniques de renforcement existantes, les matériaux composites se sont récemment développés et sont de plus en plus couramment utilisés comme alternative aux matériaux conventionnels, principalement en raison de leur haute résistance et rigidité spécifique, mais aussi à cause de leurs propriétés mécaniques ajustables.

Cependant, le mode de rupture le plus important des poutres métalliques renforcées : le décollement de la plaque de renforcement entre la plaque composite et la poutre. En effet, depuis que le renforcement par les matériaux composites a été mis en œuvre, de nombreux essais en laboratoire ont permis de conclure que le délaminage de la plaque de renforcement est le mode de rupture le plus fréquent dû à une forte concentration des contraintes au bord de la plaque de renforcement.

Notre travail, présente une méthode analytique pour l'analyse des contraintes d'interface dans les poutres métalliques réhabilitées par des plaques en composites FGM poreux.

La présente étude propose une méthode analytique permettant d'analyser les contraintes d'interface au niveau de la couche d'adhésif d'une poutre en acier, la nature des matériaux composites a été prise en compte dans l'analyse théorique en supposant une répartition linéaire des contraintes à travers l'épaisseur de l'adhésif. Les résultats de cette méthode coïncident parfaitement avec ceux issus de la littérature.

Les mots clés : matériaux composites, poutre métallique, collage, renforcement, décollement, contraintes d'interface, matériau à gradient de propriété.

Abstract

The premature damage of the steel elements of structures requires a strengthening or a repairing. Among the existing techniques of reinforcement, the composite materials recently developed and are being increasingly used as alternatives for conventional materials primarily because of their high strength, specific stiffness, light weight and adjustable properties. However, however, the most important mode of rupture of these reinforced beams: debonding between the composite plate and steel beam. As matter of fact, since the reinforcement by composite materials was implemented, many tests laboratory allowed to conclude that the delamination of the reinforcement plate is the most frequent failure mode due to a high stresses concentration at the end of the reinforcement plate.

Our work presents an analytical method for analysis of interface stresses in the steel beams rehabilitated with a porous FGM plates.

The present study propose analytical method to analyze interface constraints at the adhesive laver level of a steel beam. The nature of composite materials has been taken into account in the theoretical analysis assuming a linear distribution of constraints through the thickness of the adhesive. The results of this method coincide perfectly with those derived from literature.

Key words: composite materials, metallic beam, collating, removal, interfacial Constraints functionally graded material.

ملخص

ان التلف المبكر للعناصر الهيكلية المعدنية يتطلب تعزيزاً أو تصليحات. ومن بين تقنيات التعزيز القائمة، تم تطوير المواد المركبة مؤخرًا وتستخدم بصورة متزايدة كبديل للمواد التقليدية ويرجع ذلك بشكل أساسي إلى قوتها العالية وصلابتها الخاصة، ولكن أيضًا إلى خصائصها الميكانيكية القابلة للتعديل.

ومع ذلك، أهم الانقطاع الأكثر شيوعاً للروافد المعدنية المقواة: فصل لوحة التعزيز بين اللوحة المركبة والرافدة. والواقع منذ أن تم تنفيذ التعزيز بالمواد المركبة، فقد أدت العديد من الاختبارات العملية إلى استنتاج مفاده أن إزالة صفيحة التعزيز هي أكثر أنماط الكسور تكراراً نتيجة لتركيز الضغط العالي على حافة لوحة التعزيز.

ويقدم عملنا طريقة تحليلية لتحليل ضغوط الواجهة في الروافد المعدنية التي تم إصلاحها باستخدام لوحات مركبة متدرجة وظيفياً ذات مسامية هذه الدراسة تقترح أسلوباً تحليلياً يسمح بتحليل الجهود السطحية على مستوى طبقة المادة اللاصقة والروافد المعدنية وقد أخذت بعين الاعتبار طبيعة المواد المركبة وفرضية التوزيع الخطي للجهودات من خلال سمك المادة اللاصقة في هذا التحليل النظري وقد تطابقت هذه النتائج تماماً مع النتائج المستخلصة نظرياً.

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

وظيفياً

Introduction générale

Une construction, qu'elle que soit sa destination (habitation, usage industriel, collectivité, spectacle...) et son principe constructif (matériau, type de structure) doit être capable de résister aux efforts qui lui sont appliqués durant sa vie. Mais au cours du temps, le matériau de construction subit des altérations et endommagements variées, locales ou globales, chimiques, physiques ou mécaniques qui affaibliront leur résistance. On appelle ce phénomène, en général, le vieillissement.

Dans la charpente métallique, les cas pathologiques sont nombreux et variés dû à la complexité de leur structure. Une structure métallique peut subir des dégradations. Cela est dû à plusieurs facteurs, soit un défaut dans la conception et la réalisation de l'ouvrage, des erreurs lors de l'étude et la conception, soit aussi l'effet du temps avec la participation d'autres effets rhéologiques tel que la corrosion, fatigue, déformation thermique...etc.

Ces facteurs influencent sur la résistance de la structure métallique et elle va diminuer petit à petit la résistance jusqu'à où les efforts appliqués deviennent plus grands que la résistance et la structure risque de se rompre.

En Algérie, depuis le 19^{ème} siècle, on commence à construire des ouvrages en acier, surtout des ponts. Après l'indépendance, on a continué à réaliser des structures métalliques comme les salles de sports et les halls industriels.

Plusieurs d'entre elles commencent à avoir des signes de vieillissement propres à l'acier (corrosion, déformation,). A la lumière de ces résultats, des nouvelles orientations concernant les techniques de construction nous ont incitées à la réflexion de nouvelles méthodes de réhabilitation afin de parer à ce phénomène naturel. La maintenance des ouvrages d'art consiste à les protéger en assurant une meilleure étanchéité ou en limitant la corrosion, à les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance, à les renforcer en améliorant les performances et la durabilité des ouvrages. C'est un problème de plus en plus préoccupant dans la mesure où le coût des ouvrages neufs est de plus en plus élevé et les conditions de réparation de plus en plus difficiles. A l'heure actuelle, les besoins en matière de maintenance, de réparation et de réhabilitation des ouvrages sont donc très importants que leur dimensionnement ou leur réalisation. Face à ce problème, le renforcement par collage de matériaux composites s'avère être une technique prometteuse.

De nos jours, la technique de renforcement par collage externe de plaque composite est l'une des méthodes de réhabilitations les plus utilisées ; et peut contribuer à la réparation rapide et efficace des structures, comme elle peut aussi rendre aux éléments porteurs leur résistance, leur rigidité et leur portance.

L'intérêt du renforcement par composites peut paraître moins évident car les renforts et le support métallique présentent des performances mécaniques très comparables. Cependant, les évolutions technologiques en cours (amélioration des techniques de mise en œuvre et de la qualité des adhésifs, apparition de composites à haut module d'élasticité) laissent penser que cette méthode de réhabilitation pourrait être davantage appliquée sur les structures métalliques en Algérie à l'avenir.

Dans ce qui suit on présente les cinq chapitres constituant le mémoire.

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 les différentes technologies de réparation et renforcement des structures métalliques

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

Le quatrième chapitre portera sur l'analyse et modélisation des contraintes d'interface dans les poutres métalliques sous chargement uniforme renforcées par des plaques en FGM et voir l'effet de la distribution des pores dans le comportement des poutres renforcées.

Le cinquième chapitre : sera consacré sur les résultats obtenus et les études paramétriques qui influent sur le comportement d'une poutre métallique endommagée réparé par FGM poreux.

CHAPITRE I

*Pathologies des
structures métalliques*

I.1. Introduction

Une construction, qu'elle que soit sa destination (habitation, usage industriel, collectivité, spectacle...) et son principe constructif (matériau, type de structure) doit être capable de résister aux efforts qui lui sont appliqués durant sa vie. Mais au cours du temps, le matériau de construction subit des altérations et endommagements variées, locales ou globales, chimiques, physiques ou mécaniques qui affaibliront leur résistance. On appelle ce phénomène, en général, le vieillissement.

Dans la charpente métallique, les cas pathologiques sont nombreux et variés dû à la complexité de leur structure. Une structure métallique peut subir des dégradations. Cela est dû à plusieurs facteurs, soit un défaut dans la conception et la réalisation de l'ouvrage, des erreurs lors de l'étude et la conception, soit aussi l'effet du temps avec la participation d'autres effets rhéologiques tel que la corrosion, fatigue, déformation thermique...etc. Ces facteurs influencent sur la résistance de la structure métallique et elle va diminuer petit à petit la résistance jusqu'à où les efforts appliqués deviennent plus grands que la résistance et la structure risque de se rompre.

En Algérie, depuis le 19^{ème} siècle, on commence à construire des ouvrages en acier, surtout des ponts. Après l'indépendance, on a continué à réaliser des structures métalliques comme les salles de sports et les halls industriels. Plusieurs d'entre elles commencent à avoir des signes de vieillissement propres à l'acier (corrosion, déformation...). A partir de ce fait, il y avait lieu de s'intéresser au patrimoine des structures métalliques civiles et industrielles et faire une évaluation de l'état de lieux, évaluer leurs états physiques et apprécier la gravité des endommagements constatées.

Un diagnostic précis des désordres et une recherche des causes de 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.

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 [**Hamelin, 2002**].

1.2.2. Erreurs matérielles

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...).[**FAKIRI, 2015**].

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.1**. 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.1**.

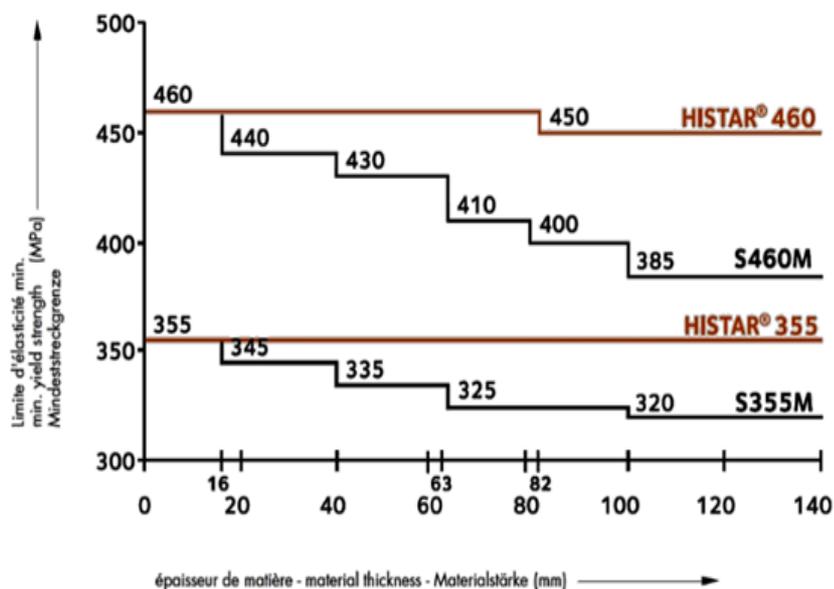


Figure I.1: La limite d'élasticité en fonction de l'épaisseur de l'acier [Simon Nuytten, 2013].

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 [Techniques de l'Ingénieur, 2002]. 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.

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 [Techniques de l'Ingénieur, 2002]. Cette erreur possible peut être éliminée au niveau des études en ne prévoyant que des diamètres différents par classes utilisées **Figure I.2**

marquage des têtes										
classes de résistance	3.6	4.6	3.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9
limite élastique R_e , N/mm ² ou MPa	180	240	320	300	400	480	640	720	900	1 080
limite à la rupture R_r , N/mm ² ou MPa	330	400	420	500	520	600	800	900	1 040	1 220
A%	25	22	14	20	10	8	12	10	9	8

Figure I.2: classe de qualité des vis [Simon Nuytten, 2013].

1.2.2.5. Causes accidentelles

On peut ranger dans cette catégorie les actions imprévisibles, donc par définition non prévues, pendant la durée de vie de la construction [Techniques de l'Ingénieur, 2002].

1.2.2.6. 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 [Techniques de l'Ingénieur, 2002].

1.2.3. 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 [**Techniques de l'Ingénieur, 2002**].

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 [**Techniques de l'Ingénieur, 2002**].

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 [**Techniques de l'Ingénieur, 2002**].

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 [**Techniques de l'Ingénieur, 2002**]. Ils sont même parfois inexistantes. Il importe au projecteur, avant toute étude, de se faire spécifier, par écrit, l'ensemble des hypothèses à retenir.

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 [**Techniques de l'Ingénieur, 2002**].

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 [**Techniques de l'Ingénieur, 2002**]. 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.

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 [Techniques de l'Ingénieur, 2002].

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 [Techniques de l'Ingénieur, 2002].

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 [Techniques de l'Ingénieur, 2002].

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 [Techniques de l'Ingénieur, 2002].

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.3** 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 [Techniques de l'Ingénieur, 2002].

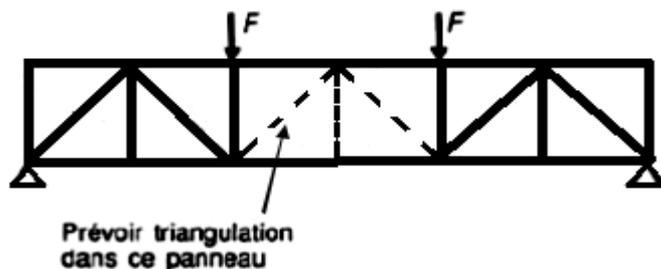


Figure I.3 : Poutre à treillis [Techniques de l'Ingénieur, 2002].

✚ 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) [Techniques de l'Ingénieur, 2002].

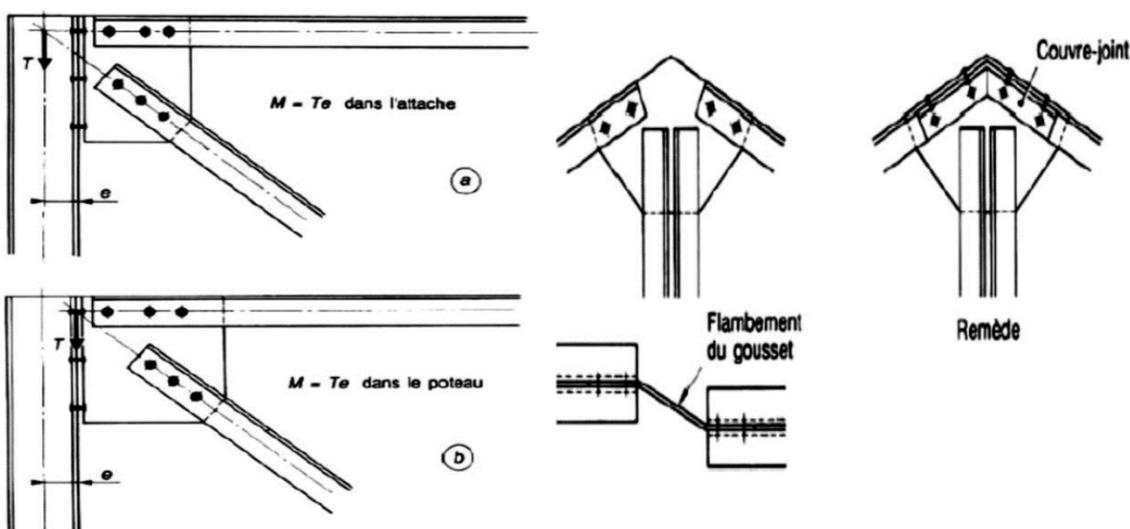


Figure I.4: Flambement de goussets [Techniques de l'Ingénieur, 2002].

✚ 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 [CAILLEBAUD, JEAN-LOUIS CHABOCHE, 2004].

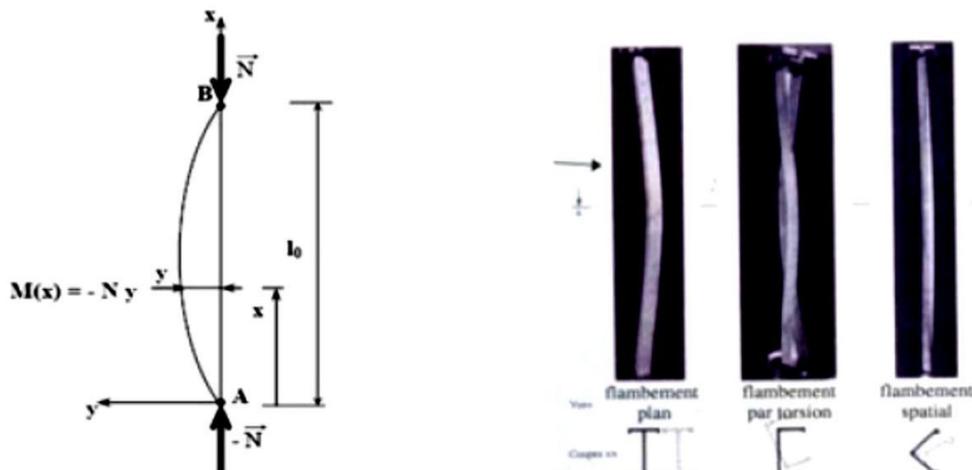


Figure 1.5: Phénomène de flambement [CAILLEBAUD, JEAN-LOUIS CHABOCHE, 2004]

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 [Résumé du cours Résistance des matériaux |Chapitre 7 : Flambement)].

✚ 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 [MANFERD. H. ROLF BEZ].

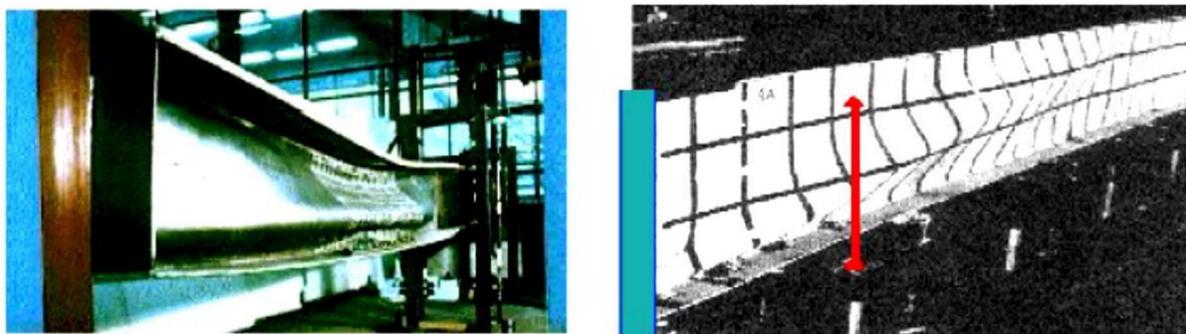


Figure I.6 : Phénomène de voilement [N. KOUIDER, 2010].



Figure I.7 : Phénomène de voilement total de l'âme [N. KOUIDER, 2010].

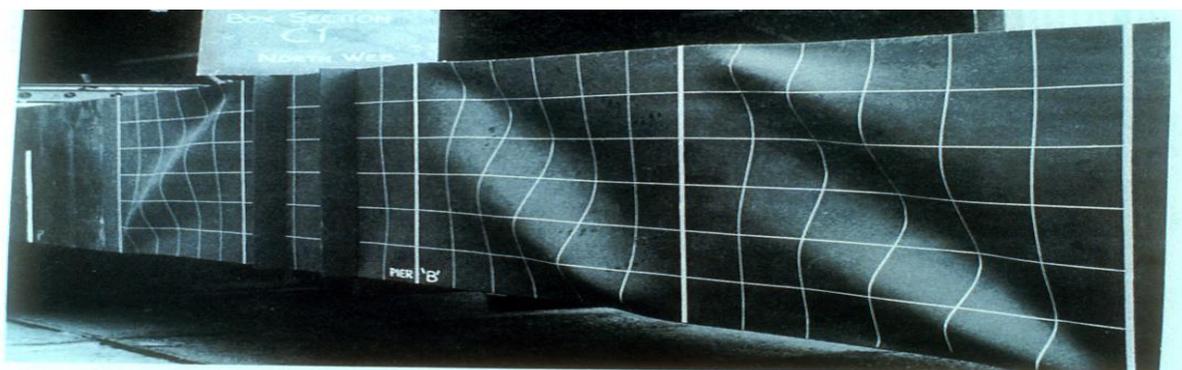


Figure I.8: Voilement local de la membrure de l'âme supérieure [N.KOUIDER,2010].

✚ 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 [PHILIPPE.BOUILLARD, 2002].



Figure I.9 : Phénomène de déversement des poutres [CAILLEBAUD, JEAN-LOUIS CHABOCHE, 2004].

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) [Dr. N. BOUMECHRA 2011].

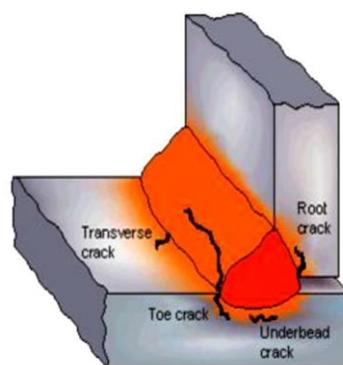


Figure I.10 : Fissuration à chaud [Dr. N. BOUMECHRA, 2011].

✚ Arrachement lamellaire

L'arrachement lamellaire est une décohésion qui se produit parallèlement au plan de laminage d'un produit, au droit d'un assemblage soudé sollicitant le produit en traction

perpendiculairement à sa surface. Elles peuvent demeurer entièrement sous la surface, ce qui les rend impossibles à détecter par inspection visuelle, ou bien émerger en pied de cordon [Dr. N. BOUMECHRA, 2011].

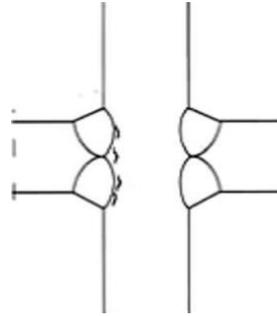


Figure I.11 : Arrachement lamellaire [Techniques de l'Ingénieur, 2002].

✚ Fissuration à froid

La fissuration à froid, ou fissuration différée, est l'incident le plus redouté parmi ceux liés à un défaut de soudabilité. Elle se produit sous les cordons de soudure, dans les zones affectées thermiquement. Son mécanisme résulte de l'action de l'hydrogène sur une microstructure métallographique fragile soumise à des contraintes. Cet hydrogène provient de la décomposition, dans l'arc électrique, de l'humidité contenue dans les enrobages et dans les flux (eau résiduelle de fabrication...) [Dr. N. BOUMECHRA, 2011].

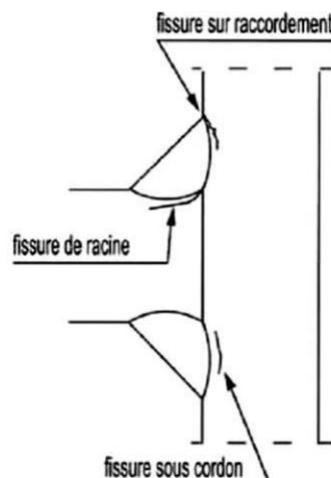


Figure I.12 : Fissuration à froid [Dr. N. BOUMECHRA, 2011].

Les défauts des soudures peuvent être nocifs de différentes façons. Ils peuvent :

- Affaiblir la résistance statique de l'assemblage ;
- Initier une fissure de fatigue ;
- Provoquer une rupture fragile, si d'autres facteurs défavorables sont réunis.

Origine des désordres :

- Causes dues à l'exécutant
- Qualification insuffisante, Mauvaises conditions d'exécution (position incorrecte de l'assemblage, mauvais accostage des pièces, ambiance anormale, intempéries...),
- Baguettes inadaptées ;
- Causes dues à l'assemblage lui-même. Elles résultent, en général, d'une mauvaise conception de l'assemblage qui entraîne :
- La difficulté de l'exécution : inaccessibilité, continuité de cordon impossible,

Le travail de cordons dans de mauvaises conditions (une amorce de fissure due à l'exécution peut être cause de rupture sous une sollicitation de traction) [Dr. N. BOUMECHRA, 2011].

✚ Défaut de boulonnages

En réalité, le comportement de ces assemblages est difficile à garantir. Il est influencé en particulier par les défauts de contact des platines et par les déformations des platines en flexion sous l'action des charges **Figure I.13** [Techniques de l'Ingénieur, 2002].

Ces facteurs peuvent amplifier les problèmes de la fatigue, des pertes de précontrainte et de la corrosion.

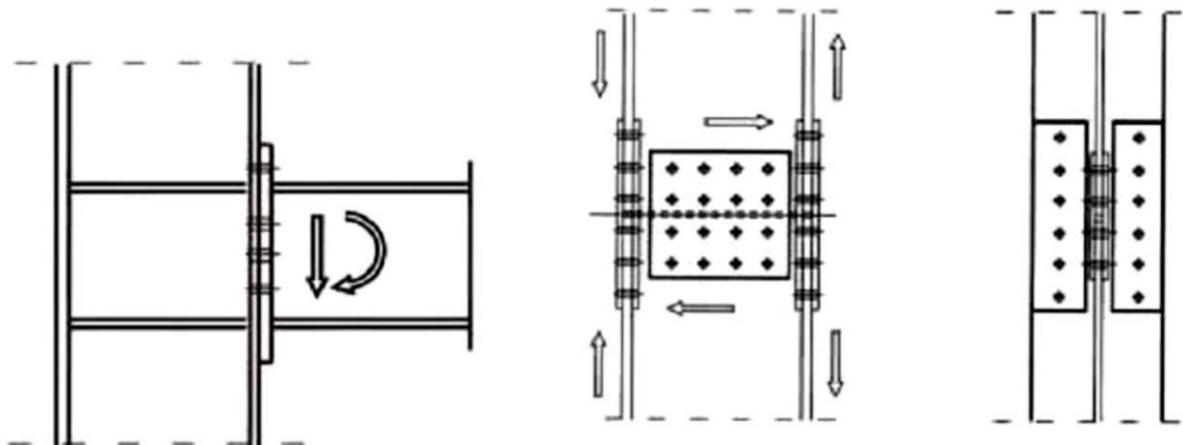


Figure I.13 : Efforts qui exercent dans un assemblage [Dr. N. BOUMECHRA, 2011].

Les principales pathologies des assemblages boulonnés sont :

- a) Les défauts de pose principalement liés au mauvais dimensionnement et choix des boulons : longueur de tige insuffisante, no respect des conditions de pose.

b) La corrosion peut prendre plusieurs aspects, d'abord enroulement de surface par défaut de protection anticorrosion pouvant aller jusqu'à la dégradation des boulons. La corrosion entre pièces peut entraîner des efforts de traction sous tête excessif.

c) La déconsolidation de boulons ordinaires par suite de serrage insuffisant et/ou de sollicitations répétées excessives se manifeste par le desserrage de boulons qui se propage à l'ensemble des boulons de l'assemblage et engendre le mouvement relatif des pièces et par suite le mauvais transfert des efforts.

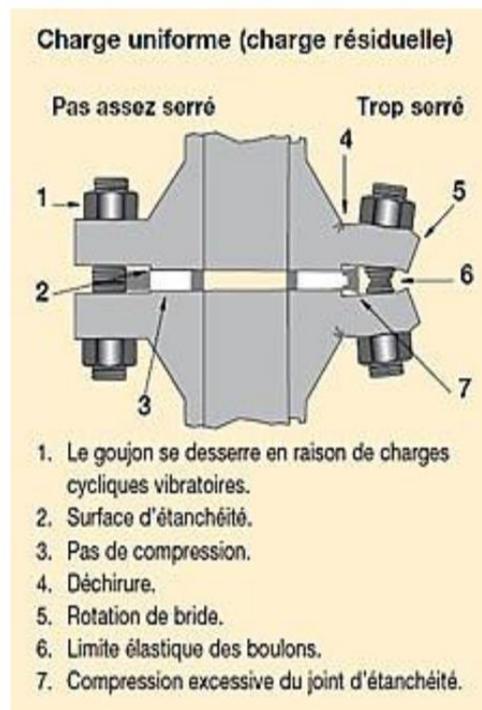


Figure I.14 : Différence entre un boulon pas assez serré et trop serré [PHILIPPE. BOUILLARD, 2002].

Le glissement des pièces par suite de dépassement de la résistance de l'assemblage sur un assemblage précontraint peut intervenir en conditions extrêmes. L'assemblage est non réparable partiellement, la reprise de l'ensemble (en l'absence de désordres autres) sera nécessaire par remplacement des couvre joints, l'élimination de l'ovalisation des perçages des tôles à rabouter et l'utilisation de boulons de diamètre supérieur [Dr.N. BOUMECHRA 2011].

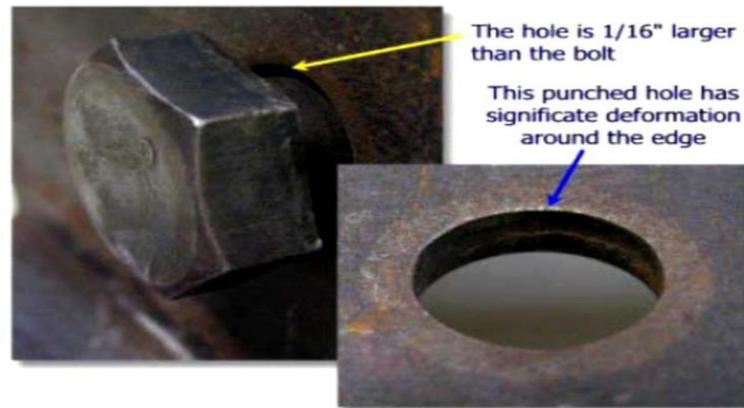


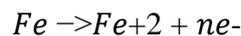
Figure I.15 : Ovalisation du trou lors du glissement de la pièce [Dr. N. BOUMECHRA, 2011].

I.2.7.3. Corrosion

+ Définition

La corrosion est une réaction inter faciale irréversible d'un matériau avec son environnement, qui implique une consommation du matériau ou une dissolution dans le matériau d'une composante de l'environnement.

L'acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone (entre 0,02 et 2% en masse). La corrosion de l'acier désigne communément l'oxydation du fer métallique au degré 0 d'oxydation par l'environnement. Les oxydants de l'environnement sont entre autre le dioxygène de l'air, l'eau et d'autres acides présents selon le degré de pollution [Simon Nuytten, 2013].

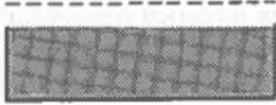
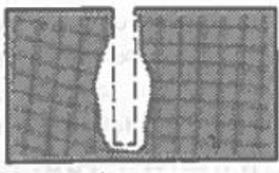
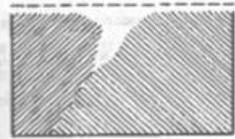
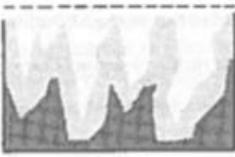
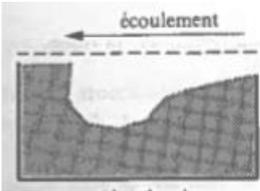
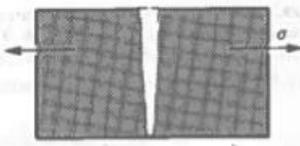


Ce phénomène est influencé par de nombreux facteurs cinétiques tels que l'humidité, la température de la pièce métallique ou l'acidité du milieu.

+ 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) [Simon Nuytten, 2013].

Tableau I.1: Typologie des développements de la corrosion [Simon Nuytten, 2013]

Corrosion	Schéma [LAN 97]	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 piqûres		La corrosion par piqûre est issue du même phénomène que la corrosion caverneuse. La piqûre 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.
Sélective		La corrosion ne s'effectue pas de façon uniforme, même si toute la surface du matériau est attaquée par la corrosion, et nous pouvons observer le développement simultané de piqûres.
Corrosion érosion		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.
Sous contrainte		Cette corrosion se développe dans un matériau contraint, tels que par exemple un élément métallique porteur dans une structure du génie civil.

✚ Corrosion de l'acier

Le fer métallique Fe⁰ (pour degré d'oxydation zéro) possède deux degrés d'oxydation (**Figure I.16**):

- Fe II, avec la formation d'ions ferreux Fe²⁺, à partir du Fe⁰
- Fe III, avec la formation d'ions ferriques Fe³⁺ à partir du Fe²⁺

E° (V)	
Oxydant	Réducteur
Au ³⁺	Au +1,52
O ₂ + 4H ⁺	2H ₂ O +1,23
Fe ³⁺	Fe ²⁺ +0,77
O ₂ + 2H ₂ O	4OH ⁻ +0,40
2H ⁺	H ₂ 0
Fe ²⁺	Fe -0,44
Zn ²⁺	Zn -0,76

Figure I.16 : Potentiel standard de quelques couples oxydo-réducteurs qui nous intéressent dans cette étude [Simon Nuytten, 2013].

Comme il a été dit plus haut, la cinétique de la réaction d'oxydation dépend des conditions du milieu. Il est bon également d'avoir à l'esprit que la thermodynamique de la réaction dépend aussi des conditions du milieu telles que l'acidité, ou le potentiel électrochimique. C'est à dire que ces réactions d'oxydation du fer ne peuvent pas se faire du point de vue thermodynamique. On peut définir alors des domaines de validité de réaction, et cela se retrouve par exemple avec le diagramme de Pourbaix (**Figure I.17**). On peut ainsi dire qu'un milieu acide, et dont le potentiel électrochimique est élevé (supérieur à -0,5V) favorise l'oxydation du fer.

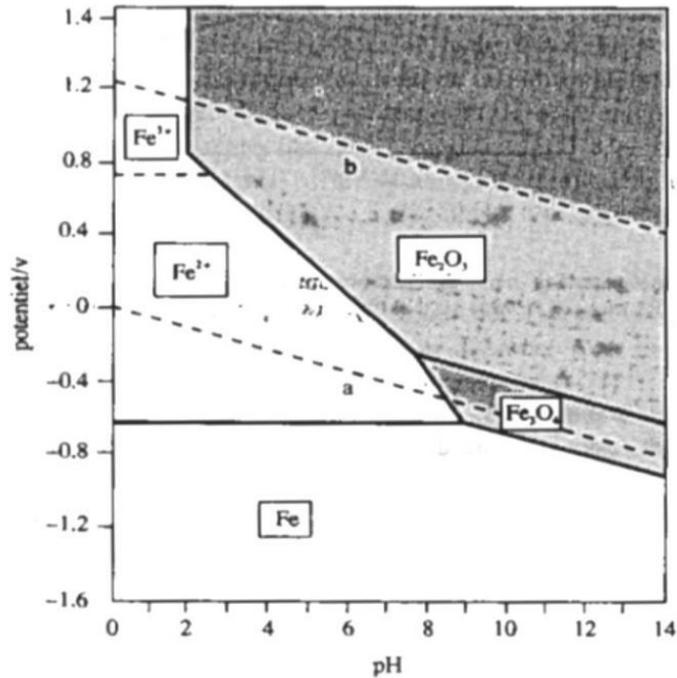


Figure I.17 : Diagramme potentiel-pH (diagramme de Pourbaix) du fer [Simon Nuytten, 2013].

On peut à cette occasion définir les trois produits principaux de la corrosion du fer présent dans l'acier :

- Formation d'oxyde Ferreux (FeO)
- Formation d'oxyde Ferrique (Fe_2O_3)
- Formation d'oxyde magnétique (Fe_3O_4)

D'une manière général le produit de corrosion du fer est appelé rouille. Il est de couleur brun-rouge et donne à la surface une texture irrégulière.

1.2.7.4 La Fatigue

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue, la modification des propriétés du métal consécutive à des cycles d'effort, cycles dont la répétition peut conduire à la rupture de la pièce.

La rupture peut se produire pour des contraintes relativement faibles, sans modification apparente de forme ou d'aspect de la pièce. La fissuration progressive est suivie d'une rupture brutale, lorsque la contrainte dans la section résiduelle dépasse celle que peut supporter le métal.

La réglementation sur le sujet est relativement récente :

- 1986 : première recommandation CECM
- 1993 : ENV Eurocode 3 chapitre 9
- 1996 : Guide SETRA – SNCF – CTICM
- 2002 : EN Eurocode 3 partie 1-9 Fatigue

Les détails constructifs ont été classés selon leur résistance en nombre de cycles à variation de contrainte donnée. Ces courbes sont référencées par rapport à la résistance à 2 millions de cycles.

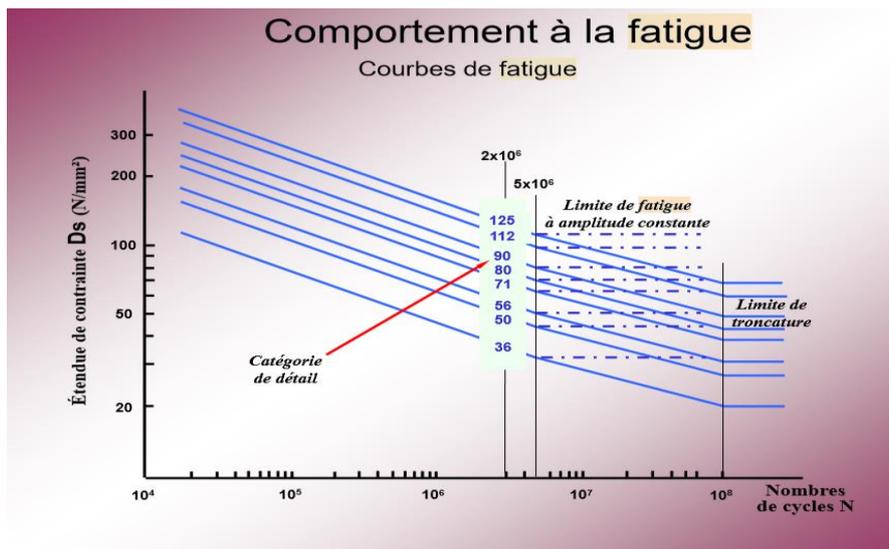


Figure I.18: Familles de courbes de Wölher [Ph. Ramondenc SNCF].

1.2.7.5. Vieillessement par redistribution d'efforts

Les ouvrages métalliques anciens sont totalement hyperstatiques = nombre de pièces croisées très important Ils sont sensibles à tous déplacements non contrôlés (tassement d'appuis, mouvements d'appareils d'appuis,...) comme à toutes déformations (respirations, instabilités,...) qui redistribuent les efforts dans la structure et créent des concentrations d'efforts Ce vieillissement est d'autant plus accéléré que les charges ont augmenté pendant la durée de vie de l'ouvrage.[Ph. Ramondenc SNCF].

I.3 Conclusion

Les structures métalliques visitées souffrent de plusieurs pathologies mais la pathologie la plus présente dans les structures métalliques est la corrosion. Celle-ci a plusieurs facteurs pour apparaître mais c'est le manque d'entretien qui accélère ce phénomène. Le volume des dégradations augmentera par le temps et réduit ainsi la durée de vie du bâtiment ou de l'ouvrage.

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. A cet effet il nous faut plus de la compréhension des mécanismes dégradant, la maîtrise des méthodes des détections des causes et pathologie ainsi que celles des séparations entre ces pathologies pour l'élaboration d'un diagnostic le plus juste possible.

Chapitre II

Techniques de réparation et renforcement des structures métalliques

II.1 Introduction

La durabilité d'un ouvrage dépend en général de nombreux paramètres : de la qualité de conception, de l'environnement d'implantation, des matériaux utilisés, de la qualité de sa réalisation ainsi que des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance.

Généralement les ouvrages résistent au temps, mais pour augmenter leur durée d'utilisation ou offrir de nouvelles fonctionnalités, ils peuvent nécessiter des opérations de renforcement ou de réparation.

Dans le but d'éviter les reconstructions, qui sont parfois coûteux. Il est impératif de trouver des moyens efficaces pour réhabiliter et/ou renforcer les ouvrages existants. Le choix des techniques de renforcement s'effectue selon l'évaluation de faisabilité c'est-à-dire les critères habituels : coût, rapidité de mise en œuvre, durabilité, réversibilité (possibilité de retour ultérieur en arrière exemple des monuments historiques), disponibilité, compétence des entreprises locales et éventuel impératif de non interruption de l'exploitation d'un ouvrage.

II.2 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) (Llanoos J, 1997).

II.2.1. Assurer la propreté de l'ouvrage

La corrosion sera fortement accélérée si on laisse s'accumuler les saletés sur l'élément considéré. Il est nécessaire de balayer, de nettoyer les surfaces à l'air comprimé ou par aspiration ; aux endroits accessibles, il faut le faire souvent et aux endroits moins accessibles, à l'intervalle régulier [SID, 1969].



Figure II.1 : Décapage à l'eau [FAME 2 ,2019].

II.2.2. 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. [SID, 1969].

II.2.3. 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 [SID, 1969].

II.2.4. 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.2 et II.3**).

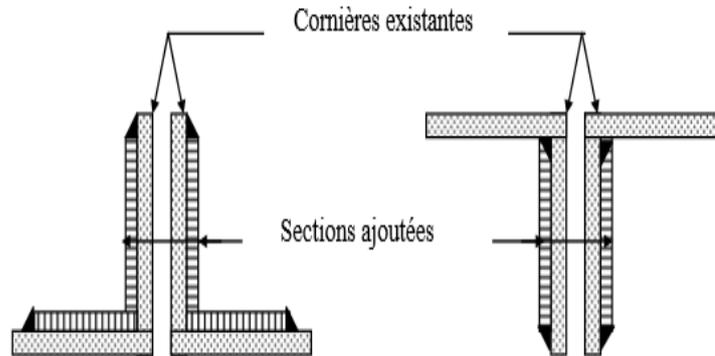


Figure II.2 : Exemple de la mise en place de plaques de renfort d'un élément de cornières. [LOUETRI. LATIFA, 2016].

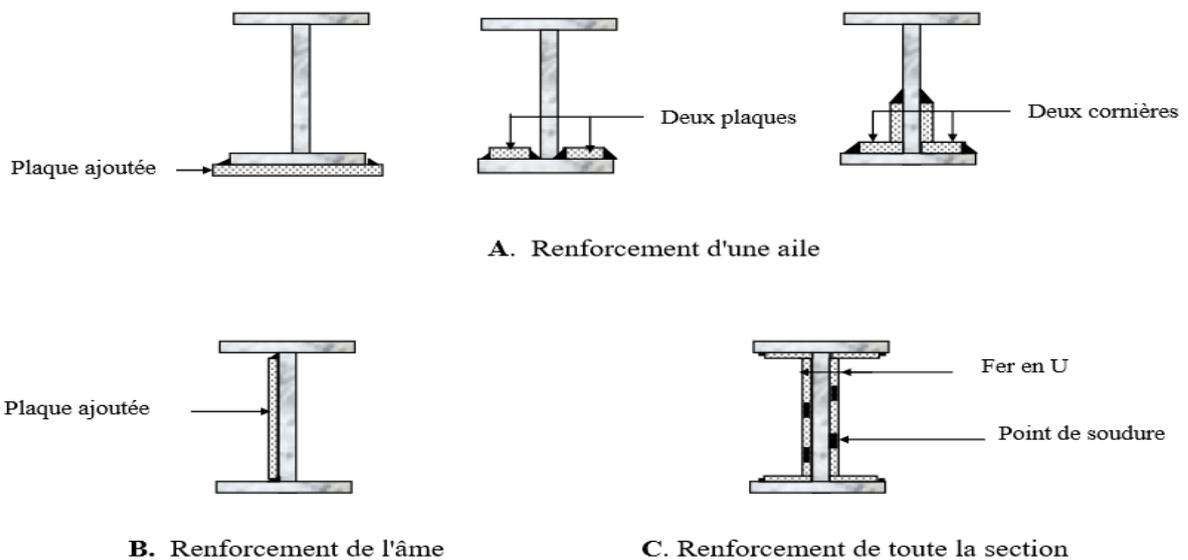


Figure II.3 : Détails de mise en place de renforts de poutre à larges ailes. [LOUETRI. LATIFA, 2016].

II.2.5. Influence des détails de construction

De nombreuses difficultés dues à la dégradation des constructions métalliques peuvent être évitées en apportant une attention particulière aux détails du projet :

- ✓ Il faut choisir des formes de sections qui aient le moins de surface exposée possible par exemple, du point de vue de la lutte contre la corrosion, une section en T est préférable aux cornières assemblées, et une poutre en caisson préférable à une section en H.
- ✓ Il faut éviter les formes ou les détails où peuvent s'accumuler débris et saletés.
- ✓ La base des colonnes doit être protégée par un gainage de béton
- ✓
- ✓ ou par des socles dépassant du niveau du sol. La surface de béton adjacente doit avoir une pente permettant d'écarter l'eau de la structure métallique.
- ✓ Les fentes et les trous dans les surfaces horizontales en acier doivent être soit bouchés de façon qu'ils ne s'engorgent pas, soit suffisamment grands pour assurer un écoulement réel.
- ✓ Il faut éviter les dispositions qui conduisent à des fentes étroites que l'on ne peut ni combler ni peindre.
- ✓ Des soudures pleines sont préférables aux joints couvrants, d'une part à cause de l'eau qui pénètre entre les plaques et d'autre part parce qu'il est impossible d'enlever tout le décapant des surfaces en contact.
- ✓ Les colonnes tubulaires doivent être remplies de béton ou fermées pour être étanche à l'air.
- ✓ Les espaces entourant les éléments en acier doivent être soit ventilés, soit obturés.

II.2.6. Gainage

On peut assurer une protection permanente en gainant l'élément tout entier avec du béton ou de la matière plastique ou en l'entourant d'un manteau de métaux non ferreux.

****Béton***

Un gainage de béton est le plus souvent utilisé pour protéger les installations portuaires soumises aux marées et situées au-dessous du niveau de la mer, les conduites enterrées, pour revêtir les canalisations, l'intérieur des colonnes tubulaires, les parties des ouvrages qui ne seront plus accessibles après la fin des travaux, et les ouvrages exposés à une atmosphère particulièrement corrosive. Un gainage de béton n'est pas un simple remplissage. Il faut

utiliser un béton de bonne qualité de 250 bars de résistance à la compression et insister sur une bonne exécution parfaitement soignée [SID, 1969].

*** Revêtement bitumineux armé**

Ces revêtements forment une excellente protection contre la corrosion et sont couramment employés pour gainer les éléments enterrés dans les sols fortement corrosifs. Les revêtements bitumineux armés sont surtout utilisés pour protéger les canalisations, les tirants et assemblages qui servent à ancrer les ouvrages de soutènement. Le travail consiste à revêtir la surface métallique à protéger d'une couche d'impression de goudron, à la vernisser et à recouvrir le tout d'une ou plusieurs enveloppes spiralées de feutre ou d'autre matériau approprié, saturé d'un mélange imperméable à base de bitume [SID, 1969].

II.2.7. 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. . [LOUETRI.LATIFA, 2016].



Figure II.4 : Soudage à l'arc avec fil fourré [Fériel.Belcadhi, 2015].

II.2.8. 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.

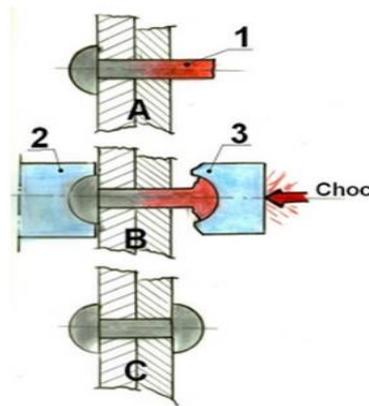


Figure II.5 : Rivet constitution d'un assemblage. [BC METALNORD, 2009]



Figure II.6 : Pose d'un rivet à tête ronde et gougeage de la tête de rivet. [BC METALNORD, 2009]

II.2.9. 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. [BELBLIDIA Salima, 2018].



Figure II.7 : Renforcement par plats métalliques [BELBLIDIA Salima, 2018].

II.2.10. La technique de précontrainte additionnelle

Réparer ou renforcer des structures fissurées ou disloquées par des pièces métalliques rapportées passives (cerceaux, boulons, tirants) est un procédé très ancien. Il est donc normal que la précontrainte, qui présente certains points communs avec ce principe, ait trouvé, dès ses débuts, un développement rapide et remarquable dans le domaine de la réparation des ouvrages. Elle permet, en effet, d'appliquer des efforts d'une intensité connue, en des points et suivant des directions bien définies, capable de s'opposer aux efforts générateurs des désordres. Elle est qualifiée d'additionnelle lorsqu'on l'applique à des ouvrages existants pour augmenter leur capacité portante ou prolonger leur durée d'exploitation [Fargeot, 1997].

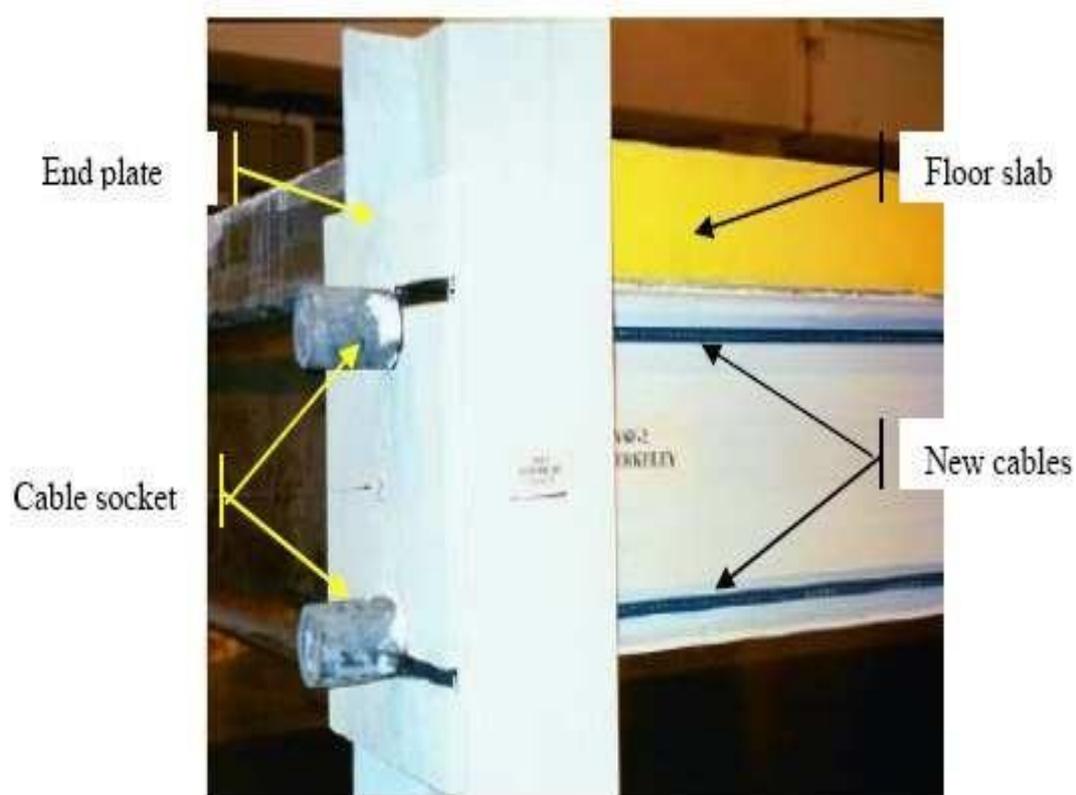


Figure II.8: Principe de renforcement par précontrainte additionnelle [Samuel Tan, 2003]

II.2.11. 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 [Zhelyazov, 2008].



Figure II.9: Différentes méthodes de renforcement par le collage de plaques en composites. [Perrier R. et al, 1996].

II.2.12. 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.10 et 11** montrent respectivement le renforcement d'un portique par une triangulation excentrée et le renforcement d'un plancher en portique plan par triangulation.

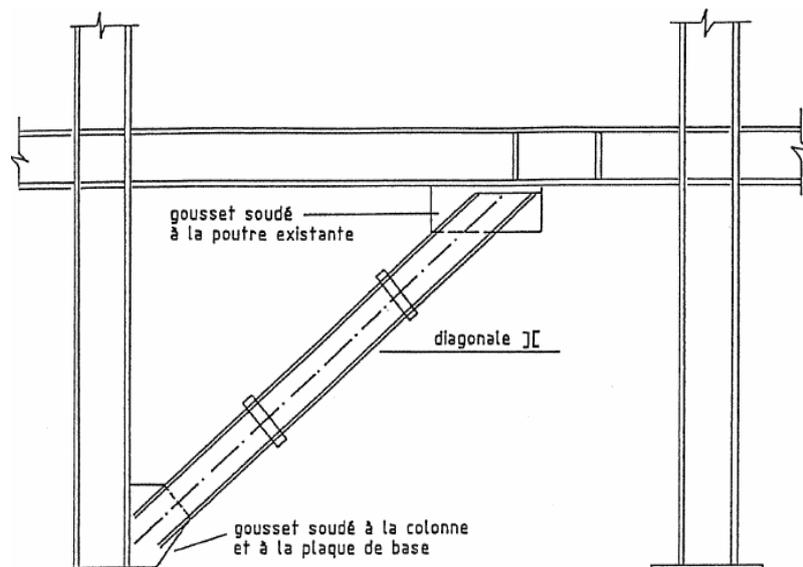


Figure II.10 : Renforcement d'un portique par une triangulation excentrée. [AMEUR Mohammed, 2009].

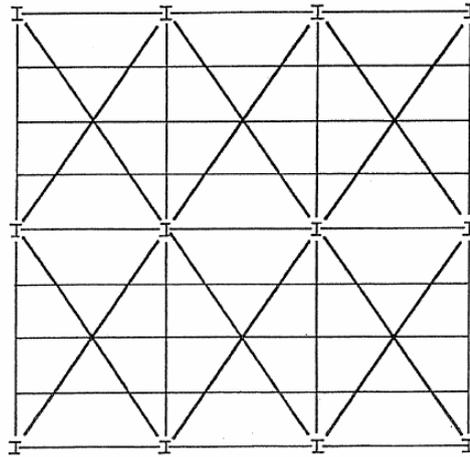


Figure II.11 : Renforcement d'un plancher en portique plan par triangulation. [AMEUR Mohammed, 2009].

II.2.13. Les différents schémas de renforcement d'une poutre métallique en I

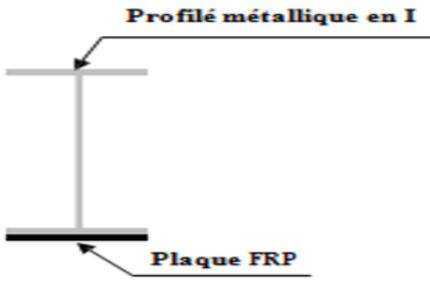
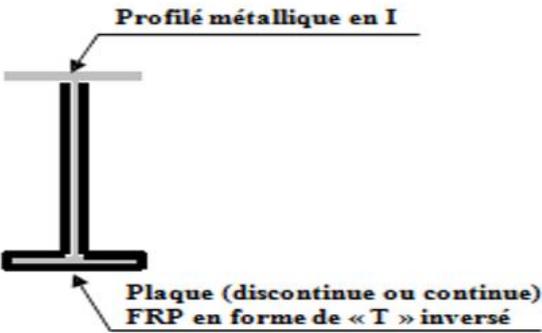
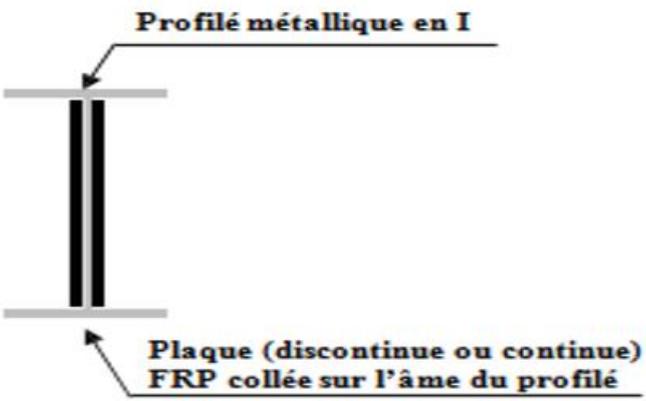
En génie civil, les matériaux composites utilisés sont essentiellement des composites carbone - époxyde ou verre - époxyde. Leurs performances mécaniques spécifiques sont en effet supérieures à celles de l'acier, principalement la résistance à la traction et en compression.



Figure II. 12 : Tablier de pont renforcé par matériaux composites [BELBLIDIA Salima, 2018].

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 (Mufti, 1991). Le tableau (II.1) représente 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). [BELBLIDIA Salima, 2018].

Tableau II. 1 : Différents schémas de renforcement d'une poutre métallique en I

Schémas de renforcement	Objectif
 <p>Diagram showing an I-beam profile with a horizontal FRP plate attached to the bottom flange. Labels: "Profilé métallique en I" (pointing to the top flange) and "Plaque FRP" (pointing to the bottom plate).</p>	En flexion
 <p>Diagram showing an I-beam profile with an inverted T-shaped FRP plate attached to the bottom flange. Labels: "Profilé métallique en I" (pointing to the top flange) and "Plaque (discontinue ou continue) FRP en forme de « T » inversé" (pointing to the inverted T-shaped plate).</p>	En flexion et cisaillement
 <p>Diagram showing an I-beam profile with two vertical FRP plates attached to the web. Labels: "Profilé métallique en I" (pointing to the top flange) and "Plaque (discontinue ou continue) FRP collée sur l'âme du profilé" (pointing to the vertical plates on the web).</p>	En cisaillement

II.3. Conclusion

Une investigation sur les méthodes de renforcement des structures métalliques endommagées a été entreprise et nous a permis de mettre en évidence la notion de la durée de vie d'un ouvrage, ainsi que la nécessité éventuelle d'une réparation ou d'une réhabilitation. C'est une des préoccupations des maîtres d'ouvrages et répond à des enjeux économiques. De nombreux mécanismes peuvent induire des dommages importants voir irréversibles pour les structures métalliques. Il a été montré précédemment que l'acier se dégrade sous l'action de nombreux facteurs. En tenant compte de l'aspect financier des ouvrages de génie civil, il est essentiellement important de les renforcer afin d'augmenter leur durée de vie soit en améliorant les performances et la durabilité de l'ouvrage, soit en compensant les pertes de rigidité ou de résistance et enfin en limitant la corrosion.

L'utilisation des matériaux composites dans l'industrie croît de jour en jour dans une diversité d'applications toujours plus grande. C'est grâce à leur microstructure évoluée et à leurs caractéristiques mécaniques élevées, faible poids, très bonnes performances vis-à-vis de la corrosion, durabilité vis-à-vis des agressions chimiques. Par conséquent les composites constituent une solution prometteuse au problème de réhabilitation des ouvrages de génie civil.

Chapitre III

Généralité sur les matériaux composites

III.1. Introduction

Beaucoup des technologies modernes nécessitent des matériaux avec des combinaisons inhabituelles des propriétés qui ne peuvent pas être obtenus par les alliages métalliques conventionnels, mais par les céramiques et les matériaux polymères. Ceci est particulièrement vrai pour les matériaux à applications automobile, aérospatiales, sous-marines et de transport.

Les chercheurs des différents secteurs notamment en aéronautique et en aérospatial, sont donc toujours à la recherche des nouveaux matériaux de structure à faible densité, robustes, rigides et résistants aux chocs et à la corrosion.

L'objet de ce chapitre est de mettre en évidence les matériaux composites, leurs types et leurs domaines d'applications dans le domaine de génie civil suivis par une présentation de matériau utilisé pour la présente recherche (FGM).

III.2. Définition du matériau composite

Un matériau composite peut être défini comme une combinaison de deux matériaux ou plus qui résulte par la formation d'un matériau dont les performances mécaniques, thermiques, électriques et physico-chimiques améliorées. Contrairement aux alliages métalliques dont chaque matériau retient ses propriétés physiques et mécaniques.

Le matériau composite est constitué d'un renfort, qui contribue aux propriétés mécaniques de la pièce, et d'une matrice, le rôle de cette dernière est d'assurer la cohésion entre les éléments du renfort. La matrice permet de transférer les flux d'efforts entre les plis, de garantir la tenue à l'environnement (Corrosion, vieillissement humide) et la tenue en température. Aujourd'hui, il existe une grande variété de matériaux composites qui peuvent être classés selon différents critères. [SAMIR BRAIRI, 2019].

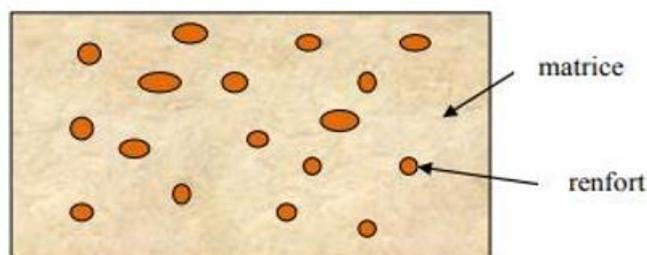


Figure III.1: Matériau composite.

III.2.1. La matrice

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

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

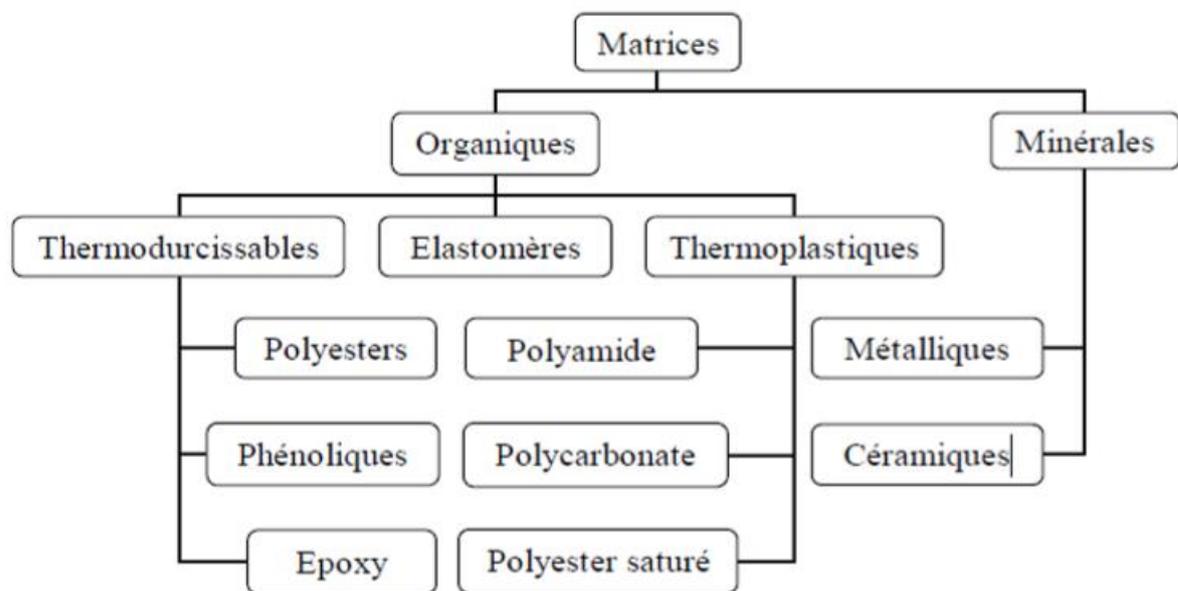


Figure III.2: Les différents types des matrices [SAMIR BRAIRI, 2019].

III.2.1.1. Les matrices minérales

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

a) Matrices métalliques

L'utilisation des matrices métalliques est encore actuellement en grande partie à un stade préindustriel. Plusieurs matériaux composites tels que, l'aluminium et ses alliages, Nickel, Titane, présentent une bonne conductibilité électrique, une bonne tenue à des

températures élevées et de plus ils possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques transverses. Leur fabrication conduit à des couts très élevés. [Laarej.Merad, 2010].

b) Matrices céramiques

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

III.2.1.2. Les matrices organiques

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

a) Les résines thermoplastiques

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



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

b) Les résines thermodurcissables

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

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

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

- Une résine principale portant les terminaisons époxydes ; c'est un liquide plus ou moins visqueux ou un solide qui est, dans certaines conditions, soluble ou fusible.

- Un **diluant** réactif (avec des terminaisons époxydes, en général) ou non réactif (solvants organiques, en général); c'est un liquide très fluide, dont le rôle est d'abaisser la viscosité du système lorsque le mélange est effectué.

- Un **flexibilisant** réactif (avec des terminaisons époxydes, en général) ou non réactif ; c'est un liquide plus ou moins visqueux, dont le rôle est de rendre la résine durcie plus flexible.

- Un **durcisseur** portant les terminaisons chimiques qui réagissent sur les terminaisons époxydes des autres ingrédients pour constituer, en fin de cycle de polymérisation, un solide, c'est un liquide ou un solide (poudre, paillettes, blocs solubles ou fusibles).

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

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

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

c) Les élastomères

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

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

d) Les adhésifs

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

- Les thermodurcissables, dont le réseau polymère possède une structure tridimensionnelle. Ils présentent une rigidité élevée et de très bonnes propriétés mécaniques,
- Les thermoplastiques, constitués de chaînes linéaires, qui présentent en général des propriétés mécaniques inférieures à celles des thermodurcissables,
- Les élastomères, très souples et peu résistants, mais qui présentent une très forte adhésivité. [BELBLIDIA Salima, 2018].

III.2.2 Le renfort

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

Parmi ses renforts on peut citer :

III.2.2.1 Fibres

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

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

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

✚Fibres de verre

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

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



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

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

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

✚Fibre de carbone

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

La figure III.4 montre une fibre de carbone qu'on trouve dans de nombreuses applications dans l'aéronautique, le spatial ainsi que les sports et loisirs de compétitions. Le prix de ces

fibres reste relativement. Les modules d'élasticité de ces fibres sont de quelques centaines de Gpa. [Toufik achour, 2011].

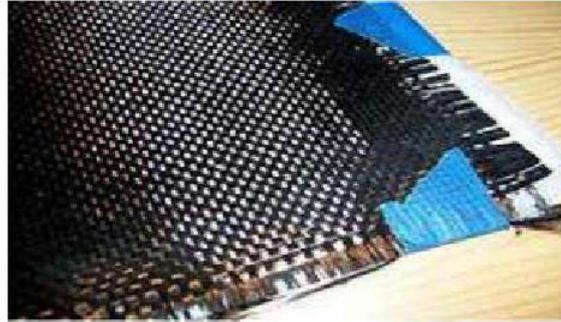


Figure III.6: Fibre de carbone. [Toufik achour, 2011].

✚ Les fibres de bore

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

✚ Les fibres de carbure de silicium :

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

✚ Les fibres d'aramide (kevlar) :

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

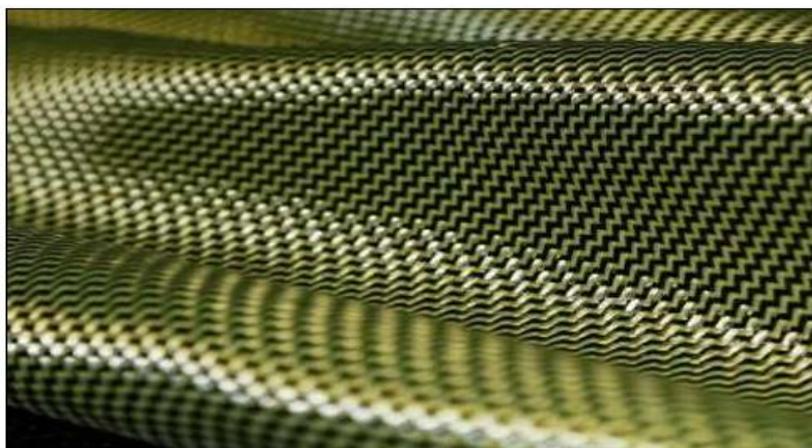


Figure III.7: Tissue en fibre d'aramide (Kevlar) [SAMIR BRAIRI, 2019].

III.3. Avantages et inconvénients de matériaux composites :

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

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

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

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

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

fibres de carbone ont été employées. La première, qui est le plus généralement employé, consiste en l'application in situ de la résine sur une toile tissée (wet lay-up method) (**Figure III.8.a**) ou deux feuillets unidirectionnels (**Figure III.8.b**). La deuxième méthode est la préfabrication du composite dans des formes variées (**Figure III.8.c**). La première méthode est plus souple et permet la réparation sur les surfaces incurvées et déformées et même autour des coins, alors que la préfabrication permet un meilleur contrôle de qualité.

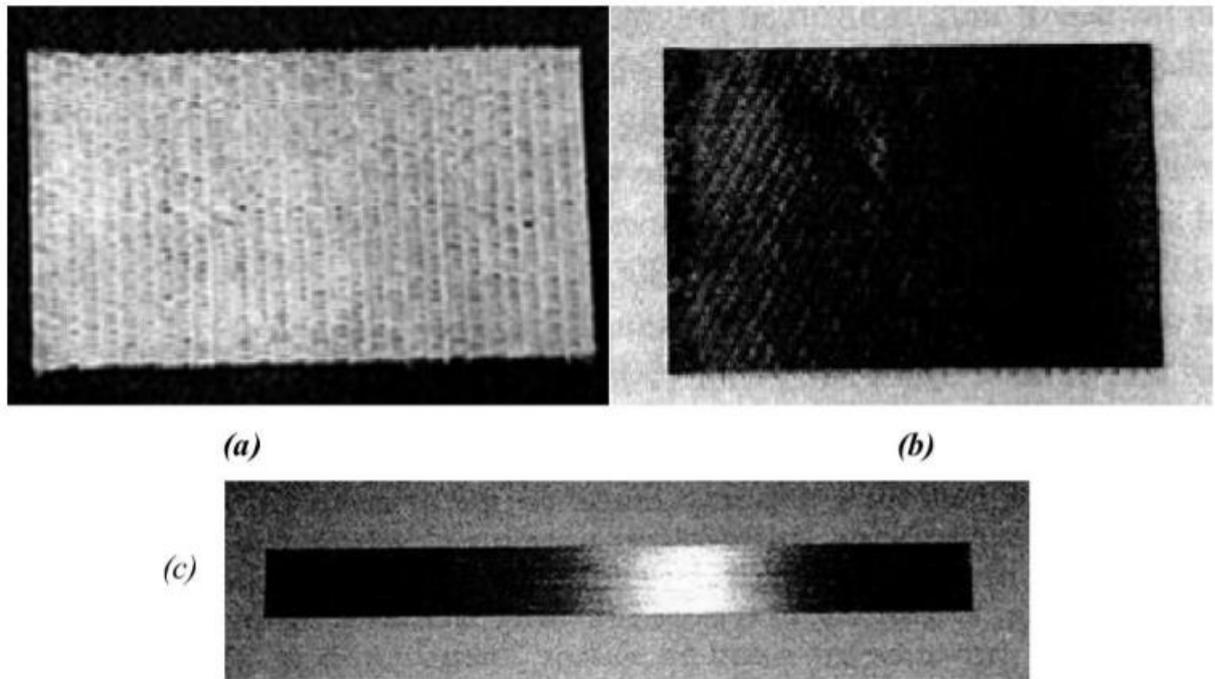


Figure III.8: Différents types de composite : (a) tissu de fibre de verre ; (b) deux feuillets de fibre de carbone ; (c) plat préfabriqué en fibre de carbone. [Cours MDC II]

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



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

III.5. Le matériau utilisé pour la présente recherche (FGM)

III.5.1. Définition du FGM

Un matériau FGM est un type de matériaux composites classé par leur microstructure variable dans l'espace ; conçue pour optimiser l'exécution des éléments de structures par la distribution de propriétés correspondantes. Les distributions de propriété sont trouvées dans une variété de produits communs qui doivent avoir des fonctions multiples (c'est-à-dire multifonctionnelles) comme les liaisons entre les particules ; qui doivent être assez dures à l'intérieur pour résister à la rupture ; mais doivent également être assez dures sur l'extérieur pour empêcher l'usure.

Généralement, les FGM sont des matériaux constitués de plusieurs couches contenant des composants différents tels que les céramiques et les métaux. Ils sont donc des composites présentant des caractéristiques macroscopiquement hétérogènes. Le changement continu dans la composition et donc dans la microstructure du matériau distingue les FGM des matériaux composites conventionnels. Il en résulte un gradient qui déterminera les propriétés des FGM dans certains cas. [KADDOURI.Djamel Eddine, 2014].

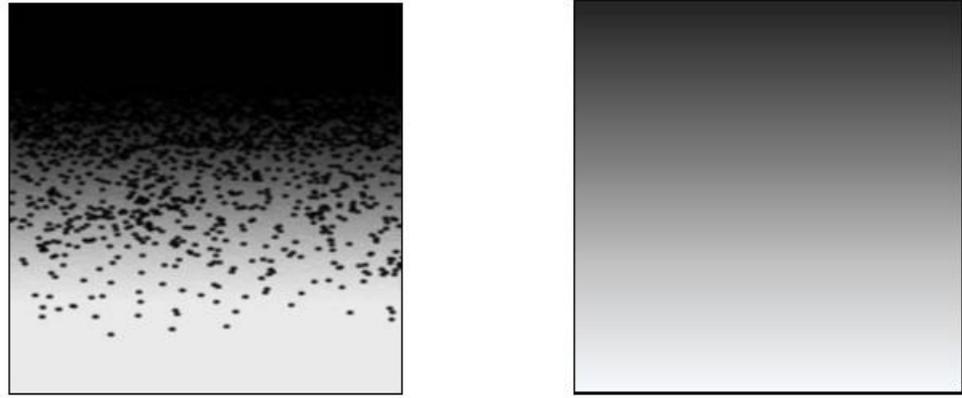


Figure III.10 : Variation continue des propriétés d'un matériau FGM. [SAMIR BRAIRI, 2019].

III.5.2 Domaine d'utilisation

Le concept des matériaux à gradient évalués FGM est applicable dans des nombreux et larges intervalles de domaines tels que les matériaux de construction, matériaux de conversion d'énergie, aéronautique, aérospatiale, nucléaire et semi-conducteurs. Ainsi, ces matériaux ont deux propriétés contradictoires : la conductivité thermique et l'isolation thermique.

Actuellement, ils permettent la production des matériaux légers, résistants et durables.

Les principaux domaines d'application des FGM sont :

- **Génie civil** : ponts à poutre en caisson, les cheminées, les fondations élastiques (ces structures de plaques peuvent être trouvées dans différents types d'applications industrielles telles que radiers), réservoirs de stockage, les piscines.
 - **Aéronautique** : composants de moteur-fusée, corps des avions spatiaux.
 - **Chimique** : l'échangeur de chaleur, tube de chaleur, récipient de réaction.
 - **Ingénierie** : outils de coupe, éléments de moteur.
 - **L'énergie nucléaire** : composante des réacteurs nucléaires, pastilles de combustible.
 - **Électronique** : semi-conducteur à bande graduée, capteurs.
 - **Optique** : fibres optiques, lentilles.
 - **Conversion d'énergie** : générateur thermoélectrique, convertisseur thermoïonique, pile à combustible.
 - **Matières biologiques** : implants, peau artificielle,
- Produits en générale** : Matériaux de constructions, corps de voiture, verres de fenêtre.
[Chedad Abdelbasset, 2015].

III.5.3. Les différentes lois de mélange du FGM

Les matériaux FGM sont une combinaison de deux ou plusieurs matériaux dont les caractéristiques et les propriétés diffèrent, où la transition entre les deux matériaux est idéalement continue et graduelle. La dépendance des propriétés de la position se traduit par la prise en compte de la loi des mélanges correspondant au modèle de Voigt [Shen.H. S., 2009]

$$P = \sum_{i=1}^n P_i V_i \quad (\text{III.1})$$

Où P_i et V_i représentent respectivement la propriété mécanique et la fraction volumique du constituant i , avec :

$$\sum_{i=1}^n V_i = 1 \quad (\text{III.2})$$

Dans la pratique, la plupart des structures FGM sont à deux constituants : de la céramique et du métal inoxydable en général. Dans ce cas, la loi de Voigt se réduit à :

$$P = P_1 V_1 + P_2 V_2 \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$$V_1 + V_2 = 1 \quad (\text{III.4})$$

Un FGM peut être définie par la variation des fractions de volume. La plupart des chercheurs emploient la fonction de puissance, la fonction exponentielle, ou la fonction sigmoïde pour décrire les fractions de volume. Les liaisons entre les particules doivent être assez dures à l'intérieur pour résister à la rupture, et également assez dures à l'extérieur pour empêcher l'usure.

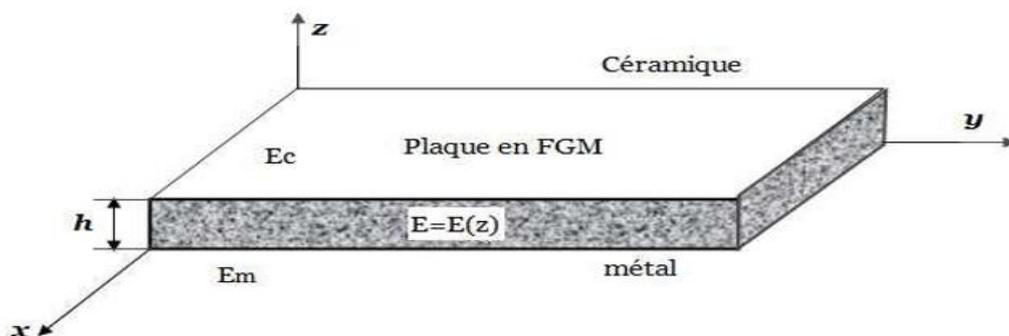


Figure III.11: Géométrie d'une plaque FGM.[SAID.Abderrahmane, 2016].

Les coordonnées x et y définissent le plan de la plaque, tandis que l'axe z est perpendiculaire à la surface moyenne de la plaque et dans la direction de l'épaisseur. Les propriétés du matériau dont le module de Young et le coefficient de Poisson sur les faces supérieures et inférieures sont différentes. Ils varient de façon continue, suivant l'épaisseur (l'axe z) soit :

$$E = E(z) \text{ et } \nu = \nu(z). \quad (\text{III.5})$$

[Jin et Batra, 1996] indiquent que l'effet du coefficient de poisson sur les déformations est négligeable comparativement à celui du module de Young. Par conséquent, le coefficient de Poisson peut être supposé comme constant. Cependant, Le module de Young dans la direction de l'épaisseur de la plaque FGM varie en fonction de la loi de puissance (P-FGM), la fonction exponentielle (E-FGM) ou avec la fonction sigmoïde (S-FGM)

III.5.3.1. Fonction puissance P-FGM

La fraction volumique de la classe P-FGM obéit à une fonction en loi de puissance comme suit :

$$V(z) = \left(\frac{z + h/2}{h} \right)^k \quad (\text{III.6})$$

Où « k » est un indice de degré d'homogénéité et « h » est l'épaisseur de la plaque. Une fois la fraction volumique locale « $V(z)$ » a été définie, les propriétés matérielles d'une plaque P-FGM peuvent être déterminées par la loi des mélanges [Bao et Wang, 1995]:

$$E(z) = E_m + (E_c - E_m) V(z) \quad (\text{III.7})$$

Où E_m et E_c sont respectivement les modules de Young de la surface inférieure(métal)

$z = -h/2$ et de la surface supérieure (céramique) $z = +h/2$ de la plaque FGM. La variation de la fraction volumique dans la direction d'épaisseur de la plaque P-FGM est représentée sur la (Figure III.12). Il apparait clairement que la fraction volumique change rapidement près de surface inférieure pour « $K < 1$ », et augmente rapidement près de la surface supérieure pour « $K > 1$ ».

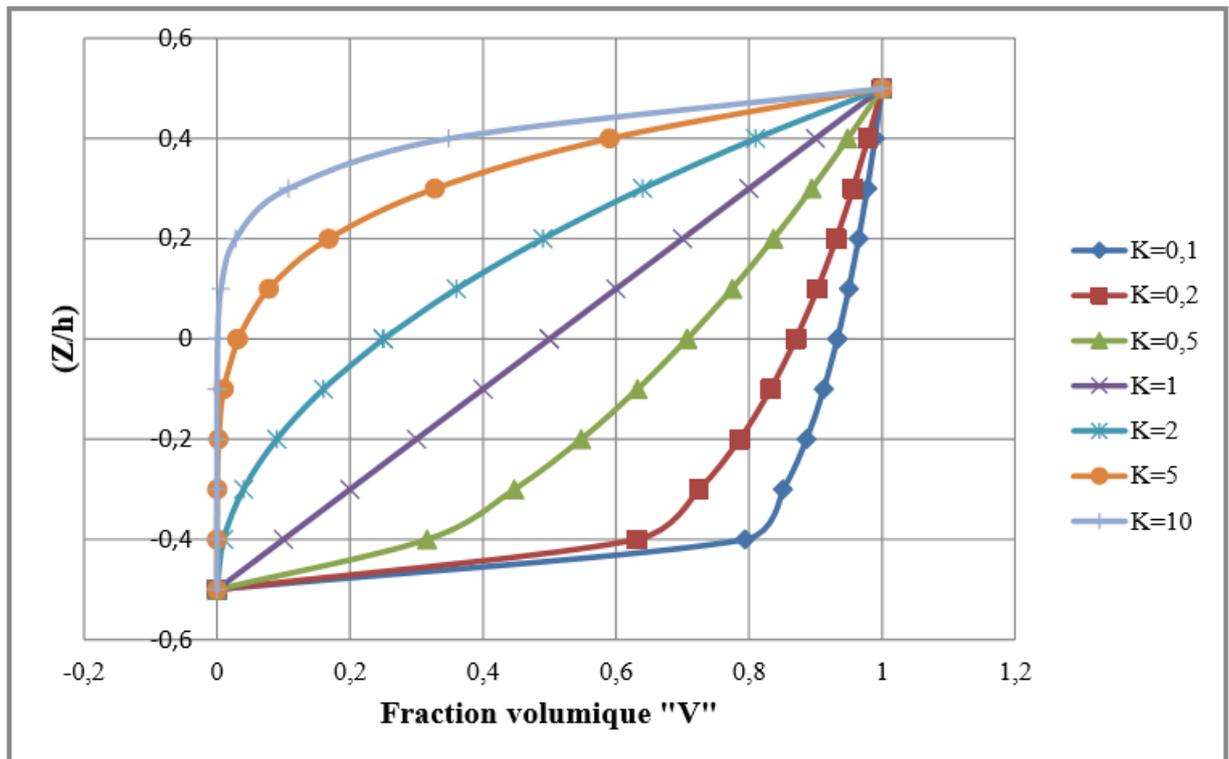


Figure III.12 : Variation de la fraction volumique dans une plaque P-FGM [MEKSI.RAFIK, 2019].

III.5.3.2. Fonction exponentielle E-FGM

Pour décrire les propriétés matérielles des matériaux FGMs, les chercheurs utilisent la fonction exponentielle qui s'écrit sous la forme [Delale et Erdogan, 1983].

$$E(z) = E_2 e^{B(z+h/2)} \tag{III.8}$$

Avec :

$$B = \frac{1}{h} \ln\left(\frac{E_1}{E_2}\right) \tag{III.9}$$

La variation du module de Young à travers l'épaisseur de la plaque E-FGM est représentée sur la (Figure III.13).

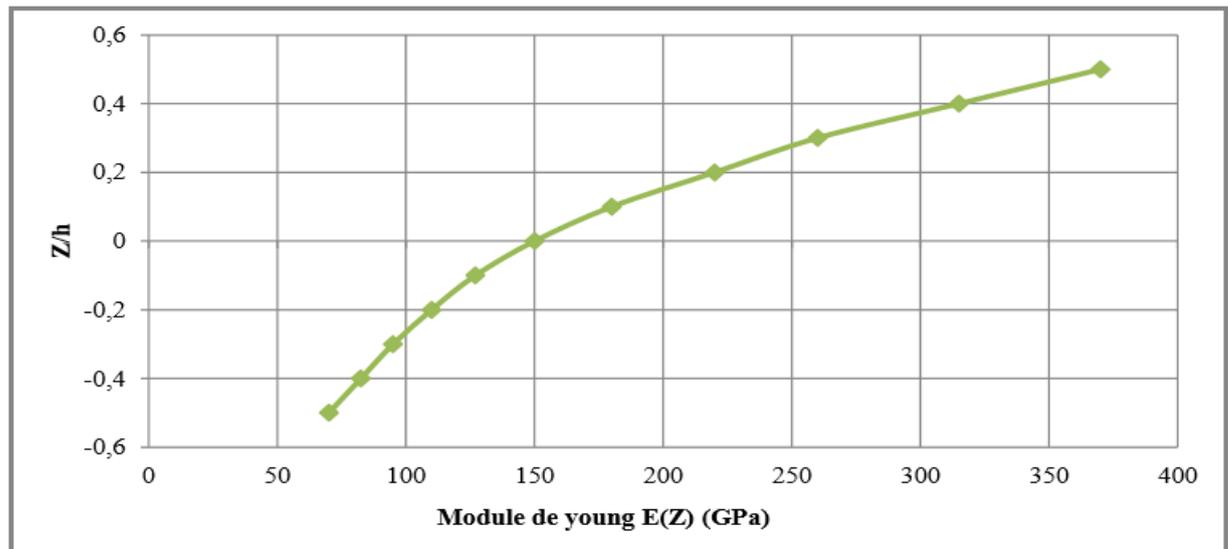


Figure III.13 : Variation du module de young dans une plaque E-FGM. [MEKSI.RAFIK, 2019].

III.5.3.3. Fonction sigmoïde S-FGM

[Chung et chi, 2003] ont défini la fraction de volume de la plaque FGM en utilisant deux fonctions de loi de puissance pour assurer une bonne distribution des contraintes parmi toutes les interfaces. Les deux fonctions de loi de puissance sont définis par :

$$V_1(z) = 1/2 \left(\frac{h/2+z}{h/2} \right)^k \quad \text{Pour } -h/2 \leq z \leq 0 \quad (\text{III.10.a})$$

$$V_2(z) = 1-1/2 \left(\frac{h/2-z}{h/2} \right)^k \quad \text{Pour } 0 \leq z \leq h/2 \quad (\text{III.10.b})$$

En utilisant la loi des mélanges, le module de Young de la plaque S-FGM peut être calculé par:

$$E(z) = V_1(z) E_1 + [1 - V_1(z)] E_2 \quad \text{Pour } -h/2 < z < 0 \quad (\text{III.11.a})$$

$$E(z) = V_2(z) E_1 + [1 - V_2(z)] E_2 \quad \text{Pour } 0 < z < h/2 \quad (\text{III.11.b})$$

La (Figure III.14) montre que la variation de la fraction volumique définie par les équations (III.11.a) et (III.11.b) représente les distributions sigmoïdes, et cette plaque FGM est appelée (Plaque SFGM).

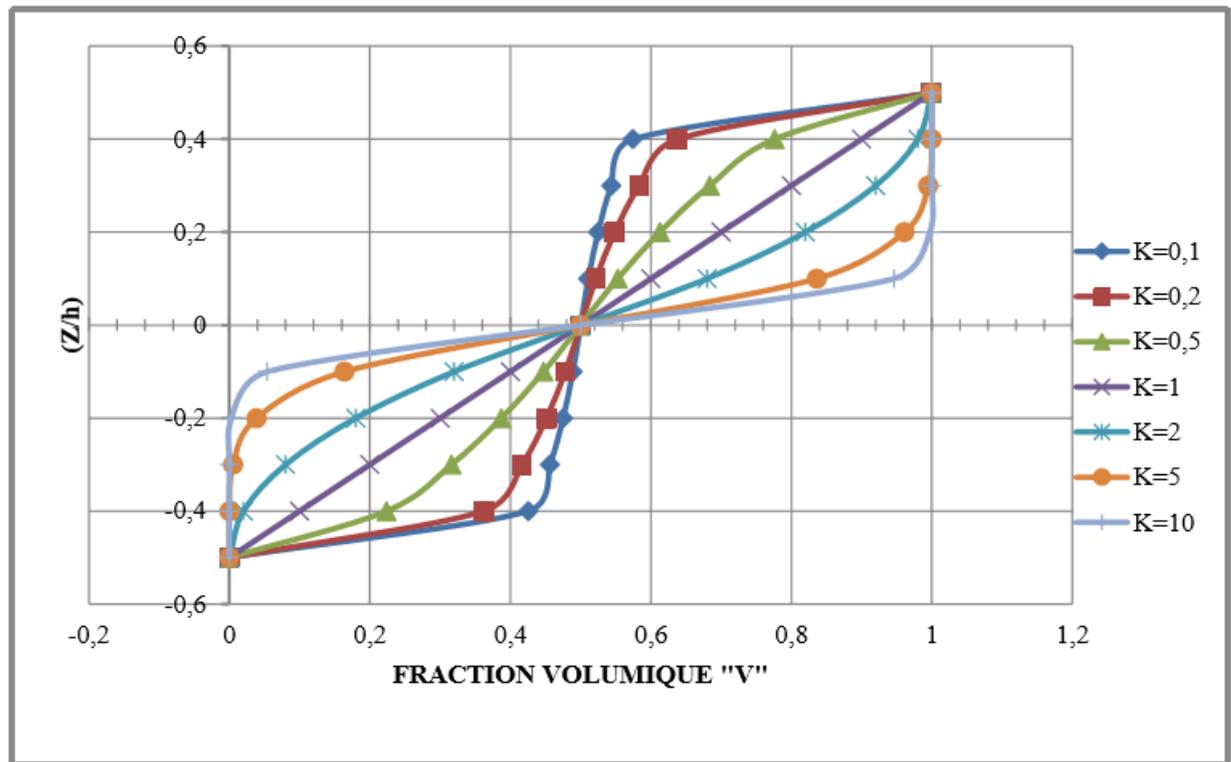


Figure III.14: Variation de la fraction volumique dans une plaque S-FGM [MEKSI.RAFIK, 2019].

III.6. Conclusion

Cette revue de la littérature nous a permis d'avoir une vision d'ensemble sur les travaux existants concernant les matériaux composites et les matériaux fonctionnellement gradués (FGM).

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

Et Ainsi nous avons défini les matériaux à gradient fonctionnel FGM, leurs domaines d'application et leurs différentes lois de mélange.

Chapitre IV

*Analyse et modélisation des
contraintes d'interface pour une
poutre métallique renforcée par
FGM poreux : effet de la porosité*

IV.1. Introduction

La présence de dégradations dans les structures métalliques est liée à la perte des caractéristiques mécanique, et pour assurer l'intégrité de la structure les éléments endommagés doivent être remplacé ou réparé, cependant dans plusieurs cas le remplacement de ces éléments est impossible ou couteux, donc le renforcement extérieur des éléments par des plaques FGM semble être la solution la plus efficace pour prolonger la durée de vie de la structure dans ces cas.

L'utilisation des plaques composite dans la réparation et la réhabilitation des ouvrages et des structures métallique, soumises à des dégradations et à des contraintes environnementales très sévères est devenue une solution prometteuse et efficace. Cette méthode de réparation consiste à coller ces plaques composites sur ces structures afin d'augmenter leur rigidité et leur résistance. 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. Le comportement de l'interface entre une poutre et la plaque composite peut être influencé par plusieurs facteurs comme les propriétés et la géométrie de la poutre, du composite et de la couche adhésive.

L'objectif de ce chapitre est proposer une analyse et modélisation des contraintes d'interface améliorée pour supporter une poutre métallique collée avec une plaque FGM ; ce qui a été objet des recherches ces dernières années.

IV.2. Analyse

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

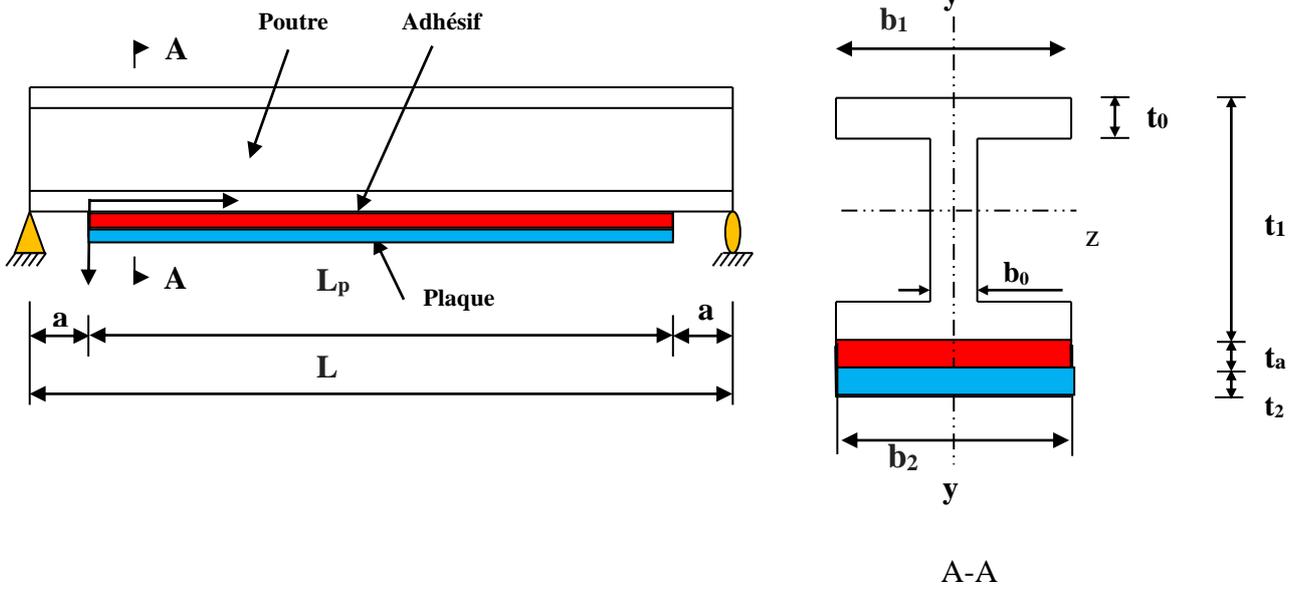


Figure IV.1 : Poutre métallique en I simplement appuyée renforcée par une plaque composite.

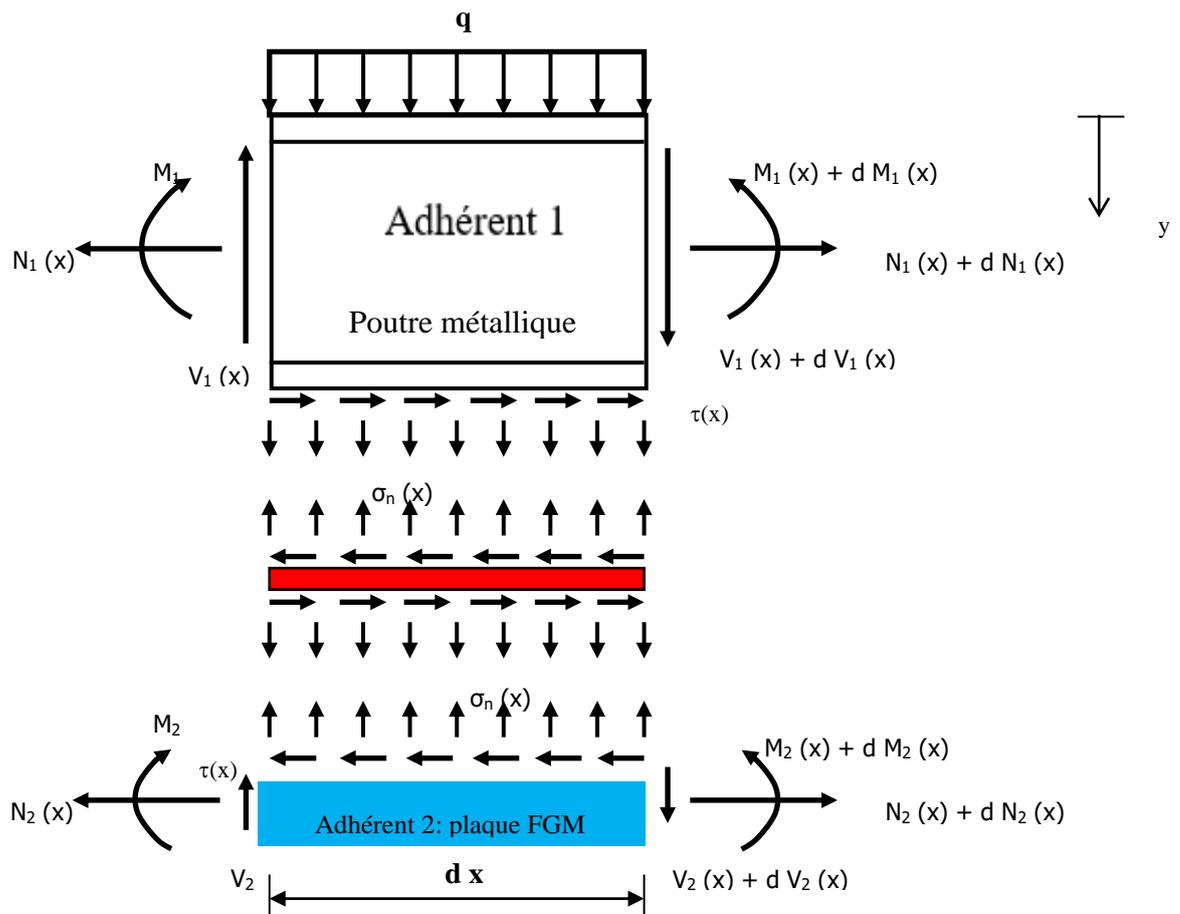


Figure IV.2 : Un segment différentiel de la poutre métallique renforcée par collage de composite

IV.2.1. Equations d'élasticité

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

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1}{E_1 A_1} + \xi \frac{t_1}{4G_1} \frac{d\tau_a}{dx} \quad (\text{IV.1})$$

$$\varepsilon_2(x) = \frac{du_2(x)}{dx} = A_{11}' \frac{(N_2(x))}{b_2} - D_{11}' \frac{y_2}{b_2} M_2(x) \quad (\text{IV.2})$$

Où $u_1(x)$ et $u_2(x)$ sont les déplacements longitudinaux à la face inférieure de l'adhérent 1 et la face supérieure de l'adhérent 2 respectivement. $M_1(x)$ et $M_2(x)$ sont respectivement les moments de flexion appliqués à la poutre métallique et la plaque FGM ; E_1 est le module de Young de la poutre métallique ; I_1 le moment d'inertie, N_1 et N_2 sont les forces axiales de l'adhérent 1 et 2 respectivement, b_2 et t_2 sont la largeur et l'épaisseur de la plaque de renforcement , $[A']=[A^{-1}]$ est l'inverse de la matrice de membrane $[A]$, $[D']=[D^{-1}]$ est l'inverse de la matrice de flexion.

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\text{Dans la direction } y : \frac{dV_1}{dx} = \sigma_n(x)b_2 \quad (\text{IV.7})$$

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

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

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

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

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

$$\tau(x) = K_s \Delta u(x) = K_s [u_2(x) - u_1(x)] \quad (\text{IV.9})$$

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

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

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

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

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = K_s \left[\left(A_{11} \frac{(N_2(x))}{b_2} - D_{11} \frac{y_2}{b_2} M_2(x) \right) - \left(\frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1}{E_1 A_1} + \xi \frac{t_1}{4G_1} \frac{d\tau_a}{dx} \right) \right] \quad (\text{IV.11})$$

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

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

$$\text{Avec : } R = \frac{E_1 I_1 D_{11}}{b_2} \quad (\text{IV.13})$$

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

$$M_T(x) = M_1(x) + M_2(x) + N(x)(y_1 + y_2 + t_a) \quad (\text{IV.14})$$

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = \frac{1}{R+1} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (\text{IV.19})$$

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

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} = K_s \left[\frac{A_{11}}{b_2} \frac{dN_2(x)}{dx} - D_{11} \frac{y_2}{b_2} \frac{dM_2(x)}{dx} - \frac{y_1}{E_1 I_1} \frac{dM_1(x)}{dx} + \frac{1}{E_1 A_1} \frac{dN_1(x)}{dx} - \xi \frac{t_1}{4G_1} \frac{d^2 \tau_a}{dx^2} \right] \quad (\text{IV.20})$$

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

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} - K_1 \left(A_{11} + \frac{b_2}{E_1 A_1} + \frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{E_1 I_1 D_{11} + b_2} b_2 D_{11} \right) \tau(x) + K_1 \left(\frac{(y_1 + y_2)}{E_1 I_1 D_{11} + b_2} D_{11} \right) V_T(x) = 0 \quad (\text{IV.21})$$

Avec :

$$K_1 = \frac{1}{\left(\frac{t_a}{G_a} + \xi \frac{t_1}{4G_1} \right)} \quad (\text{IV.22})$$

ξ Est un coefficient qui tient compte de la forme géométrique de la section étudiée, il est donné par :

$$\xi = \frac{1}{2A_1 t_1^2} \left[b_1 \left(-t_0^3 + 6t_1^2 t_0 - t_1^3 + (t_1 - t_0)^3 \right) + b_0 \left(3t_1^2 (t_1 - 2t_0) - (t_1 - t_0)^3 + t_0^3 \right) \right] \quad (\text{IV.23})$$

- Pour une section rectangulaire ($b_1=b_0$) on a $\xi = 1$
- Pour une section en I on a $\xi < 1$

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

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

Avec :

$$\lambda^2 = K_1 \left(A_{11}' + \frac{b_2}{E_1 A_1} + \frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{E_1 I_1 D_{11}' + b_2} b_2 D_{11}' \right) \quad (\text{IV.25})$$

$$m_1 = \frac{K_1}{\lambda^2} \left(\frac{(y_1 + y_2)}{E_1 I_1 D_{11}' + b_2} D_{11}' \right) \quad (\text{IV.26})$$

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

$$\tau(x) = \left[\frac{m_2 a}{2} (L - a) - m_1 \right] \frac{q e^{-\lambda x}}{\lambda} + m_1 q \left(\frac{L}{2} - a - x \right) \quad 0 \leq x \leq L_p, \quad m_2 = \frac{K_1 y_1}{E_1 I_1} \quad (\text{IV.27})$$

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

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

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

$$\sigma_n(x) = K_n \Delta w(x) = K_n [w_2(x) - w_1(x)] \quad (\text{IV.28})$$

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

$$K_n = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x)} = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x) / t_a} \left(\frac{1}{t_a} \right) = \frac{E_a}{t_a} \quad (\text{IV.29})$$

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

En dérivant l'équation (IV.28) deux fois il en résulte :

$$\frac{d^2\sigma_n(x)}{dx^2} = K_n \left[\frac{d^2w_2(x)}{dx^2} - \frac{d^2w_1(x)}{dx^2} \right] \quad (\text{IV.30})$$

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

$$\frac{d^2w_1(x)}{dx^2} = -\frac{M_1(x)}{E_1I_1}, \quad \frac{d^2w_2(x)}{dx^2} = -\frac{D_{11}'M_2(x)}{E_2I_2} \quad (\text{IV.31})$$

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

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

$$\text{Adhérent 1 :} \quad \frac{d^4w_1(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_1I_1}b_2\sigma_n(x) + \frac{y_1}{E_1I_1}b_2 \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_1I_1} \quad (\text{IV.32})$$

$$\text{Adhérent 2 :} \quad \frac{d^4w_2(x)}{dx^4} = -D_{11}'\sigma_n(x) + D_{11}'y_2 \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (\text{IV.33})$$

La substitution des équations (IV.32) et (IV.33) dans la quatrième dérivée de la contrainte normale obtenue à partir de l'équation (IV.28) donne l'équation différentielle régissant la contrainte normale d'interface :

$$\frac{d^4\sigma_n(x)}{dx^4} + K_n \left(D_{11}' + \frac{b_2}{E_1I_1} \right) \sigma_n(x) - K_n \left(D_{11}'y_2 - \frac{y_1b_2}{E_1I_1} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{qK_n}{E_1I_1} = 0 \quad (\text{IV.34})$$

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

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] + e^{\beta x} [C_3 \cos(\beta x) + C_4 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (\text{IV.35})$$

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

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

Où :

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_n}{4} \left(D_{11}' + \frac{b_2}{E_1I_1} \right)} \quad (\text{IV.37})$$

$$n_1 = \left(\frac{y_1 b_2 - D_{11} E_1 I_1 y_2}{D_{11} E_1 I_1 + b_2} \right) \quad (\text{IV.38})$$

$$n_2 = \frac{1}{D_{11} E_1 I_1 + b_2} \quad (\text{IV.39})$$

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

$$C_1 = \frac{K_n}{2\beta^3 E_1 I_1} [V_T(0) + \beta M_T(0)] - \frac{n_3}{2\beta^3} \tau(0) + \frac{n_1}{2\beta^3} \left(\frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \quad (\text{IV.40})$$

$$C_2 = -\frac{K_n}{2\beta^2 E_1 I_1} M_T(0) - \frac{n_1}{2\beta^2} \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \quad (\text{IV.41})$$

Où :

$$n_3 = b_2 K_n \left(\frac{y_1}{E_1 I_1} - \frac{D_{11} y_2}{b_2} \right) \quad (\text{IV.42})$$

IV.3. Conclusion

Dans ce chapitre on présente une méthode pour le calcul des contraintes normales et de cisaillement au niveau de la colle d'une poutre métallique renforcée par une plaque FGM, l'élément important de la présente analyse est la prise en considération l'effet de la porosité (linéaire et non linéaire).

Chapitre V

Résultats

Et

Discussions

V.1. Introduction

La plaque de renforcement en matériau FGM avec des propriétés mécaniques variant suivant l'épaisseur selon une loi de mélange bien déterminée. Les défauts dans ces plaques qui peuvent surgir lors du processus de fabrication sous forme de porosité sont pris en compte lors de la détermination des contraintes d'interface.

Dans ce chapitre nous présentons la validation du modèle analytique. Une étude paramétrique détaillée sera présentée afin de souligner les facteurs influant sur les contraintes au niveau de l'interface poutre métallique-plaque FGM et ainsi l'effet de distribution de la porosité d'une poutre métallique renforcé par FGM poreux et voir les différents paramètres qui influencent les contraintes d'interface. L'élément important de la présente analyse est la prise en considération l'effet de la porosité sur la variation des contraintes d'interface suivant différents types de distribution (linéaire et non linéaire)

V.2. Présentation du modèle

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

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

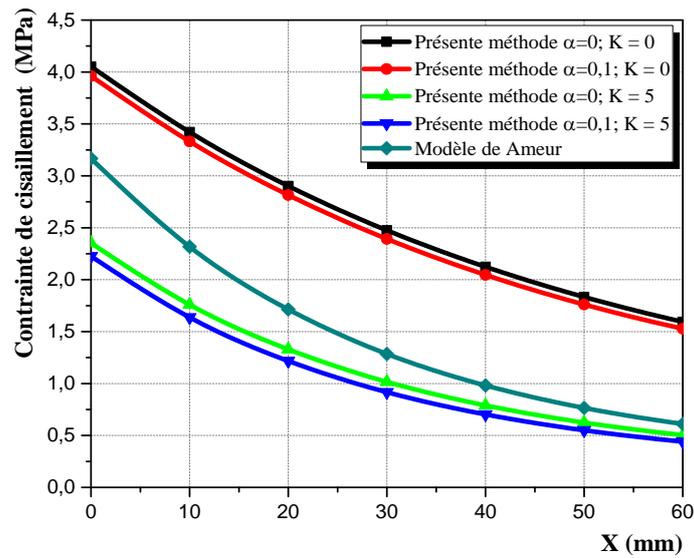
Composantes	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Module de Young (Mpa)	Coefficient de poisson	Module de cisaillement (Mpa)
Adhésif	$b_a = 150$	$t_a = 2$	$E_a = 3000$	$\nu = 0.35$	$G_a = 1111.1$
FGM	$b_2 = 150$	$t_2 = 4$	$E_c = 380000$ $E_m = 70000$	$\nu = 0.3$	
Poutre métallique	$b_1 = 150$ $b_0 = 7.1$	$t_1 = 300$ $t_0 = 10.7$	$E_1 = 210000$	$\nu = 0.3$	$G_{acier} = 80769.2$

Tableau V.2 : chargement et géométrie.

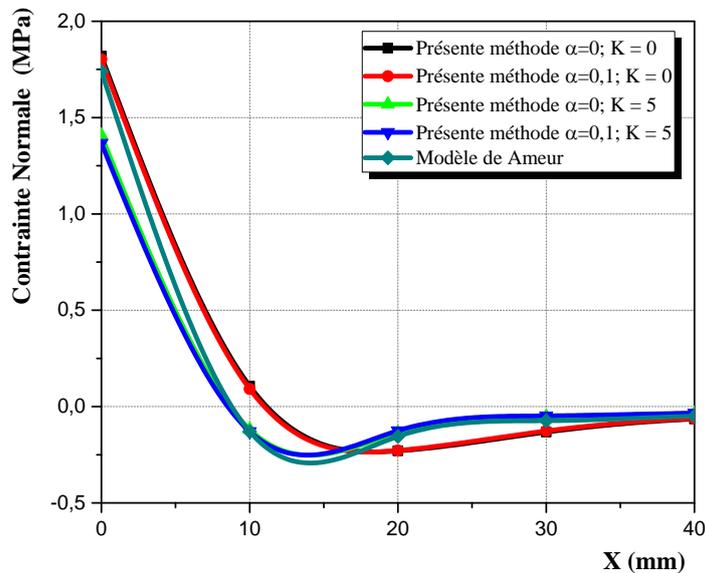
Composantes	Valeurs
Charge répartie	$q = 50 \text{ KN/m}$
Longueur totale	$L = 3000 \text{ mm}$
Distance entre appui et plaque	$a = 300 \text{ mm}$

V.2.1. Validation du modèle

La présente méthode a été validée en comparant les résultats des contraintes d'interface avec ceux obtenus à partir de la méthode d'Ameur [Ameur Mohammed, 2009]. Les résultats obtenus à partir de la méthode d'Ameur coïncident avec ceux issus de la présente méthode comme c'est illustré dans la figure (V.1)



a



b

Figure V.1 : Validation de la présente méthode en comparant avec celle d'Ameur [Ameur Mohammed, 2009], a) Contrainte de cisaillement, b) contrainte normale

V.3. forme de distribution de la porosité

V.3.1. Distribution linéaire

L'une des caractéristiques importantes du FGM poreux est le degré de porosité, c'est-à-dire le pourcentage de vide existe de nombreuses formes de distribution de la porosité linéaire nous les mentionnons sur le tableau (V.3)

Tableau V.3 : Différentes formes de distribution linéaire de la porosité

La forme de distribution	La formule
Distribution uniforme	$E = (E_{11} - E_{22}) * \left(\frac{z}{h} + 0.5\right)^k + E_{22} - (E_{11} + E_{22}) * \frac{\alpha}{2}$
Distribution linéaire sous forme O	$E = (E_{11} - E_{22}) * \left(\frac{z}{h} + 0.5\right)^k + E_{22} - (E_{11} + E_{22}) * \frac{\alpha}{2} * \left(1 - 2 * \frac{ z }{h}\right)$
Distribution linéaire sous forme X	$E = (E_{11} - E_{22}) * \left(\frac{z}{h} + 0.5\right)^k + E_{22} - (E_{11} + E_{22}) * \frac{\alpha}{2} * \left(2 * \frac{z}{h}\right)$
Distribution linéaire sous forme V	$E = (E_{11} - E_{22}) * \left(\frac{z}{h} + 0.5\right)^k + E_{22} - (E_{11} + E_{22}) * \frac{\alpha}{2} * \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h}\right)$
Distribution linéaire sous forme v inverse	$E = (E_{11} - E_{22}) * \left(\frac{z}{h} + 0.5\right)^k + E_{22} - (E_{11} + E_{22}) * \frac{\alpha}{2} * \left(\frac{1}{2} - \frac{z}{h}\right)$

V.3.1.1. Effet d'indice de porosité α

L'effet d'indice de porosité α sur la variation des contraintes d'interface est représenté sur la figure (V.2) en utilisant une distribution uniforme linéaire avec $K=5$. On constate que l'augmentation d'indice de porosité α conduit à une réduction des contraintes d'interfaces.

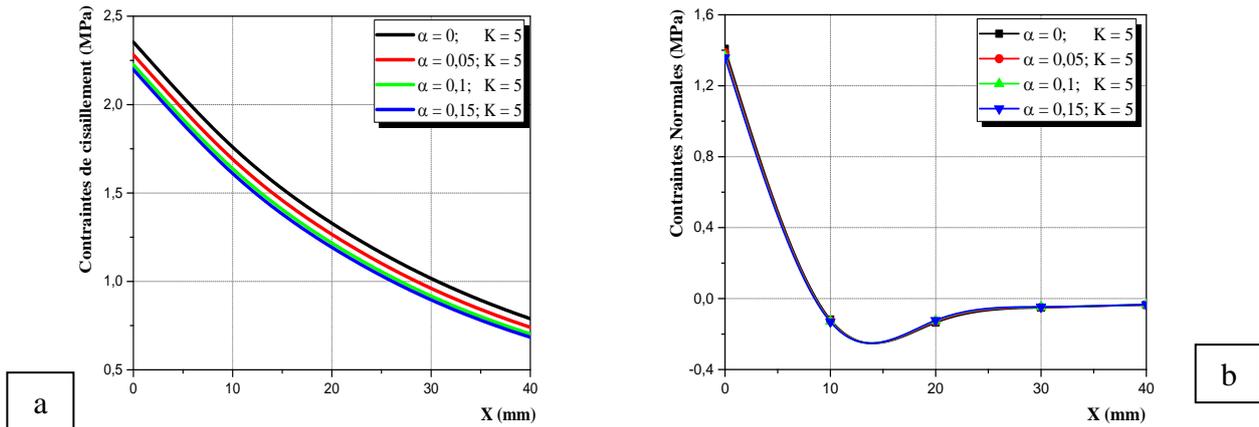


Figure V.2: Effet d'indice de porosité α sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme linéaire).
 a) Contrainte de cisaillement, b) contrainte normale

V.3.1.2. Effet de l'indice de puissance K

Dans la figure (V.3) et le tableau (V.4) on présente l'effet de l'indice de puissance K sur la variation des contraintes d'interface en utilisant une distribution uniforme linéaire avec $\alpha = 0,1$. Cette figure montre clairement que les contraintes d'interface (contrainte de cisaillement et contrainte normale) sont affectés par la variation de l'indice de puissance K on remarque que l'accroissement de l'indice de puissance K conduit à une réduction significative des contraintes d'interface maximales.

Tableau V.4 : Effet de l'indice de puissance K sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme linéaire).

K	Distribution Uniforme $\alpha = 0,1$		Distribution O $\alpha = 0,1$		Distribution V $\alpha = 0,1$		Distribution Inv V $\alpha=0,1$		Distribution X $\alpha =0,1$	
	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ Mpa)	σ Mpa)	τ Mpa)	σ Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)
0	3,96086	1,80296	3,98955	1,80801	3,99271	1,80858	4,02084	1,81347	4,02394	1,81400
2,5	2,88664	1,56343	2,85645	1,55532	2,86253	1,55697	2,91646	1,57137	2,92236	1,57296
5	2,22607	1,36700	2,24124	1,37194	2,20415	1,35975	2,28163	1,38510	2,29004	1,38782
7,5	1,83030	1,22862	1,89099	1,25098	1,90158	1,25482	1,99382	1,28786	2,00378	1,29139
10	1,66381	1,16493	1,77049	1,20615	1,78192	1,21048	1,88104	1,24733	1,89170	1,25124
20	1,59081	1,13590	1,70335	1,18040	1,71529	1,18501	1,81857	1,22424	1,82966	1,22839

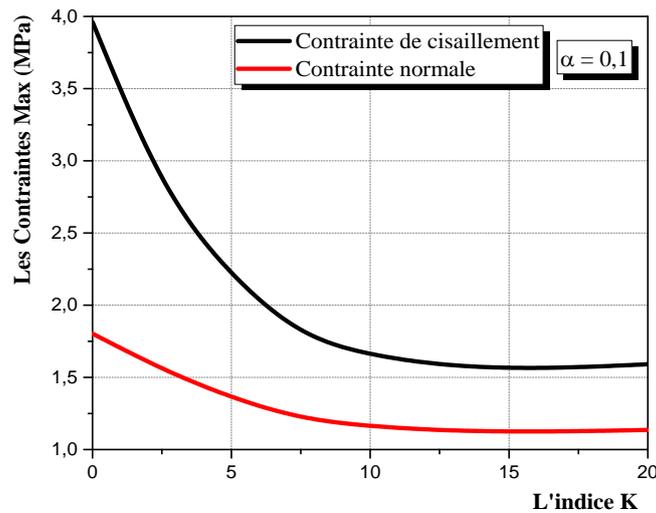


Figure V.3 : Effet de l'indice de puissance K sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme linéaire).

V.3.1.3. Effet de l'épaisseur de la colle t_a

L'effet de l'épaisseur de la couche d'adhésif sur la variation des contraintes d'interface est représenté sur la figure (V.4) et tableau (V.5) en utilisant une distribution uniforme linéaire avec $\alpha = 0,1$ et $K = 5$. L'augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésif mène à une réduction significative des contraintes d'interface maximales. Particulièrement aux voisinages des bords, est fortement recommandée. En plus, ces contraintes diminuent au cours du temps pour converger vers une valeur constante.

Tableau V.5 : Effet de l'épaisseur de la colle t_a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme linéaire).

t_a (mm)	Distribution Uniforme $\alpha = 0,1$		Distribution O $\alpha = 0,1$		Distribution V $\alpha = 0,1$		Distribution Inv V $\alpha=0,1$		Distribution X $\alpha =0,1$	
	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)
1	2.71099	1.96792	2.82094	2.00969	2.80411	2.00338	2.90935	2.04243	2.89323	2.03650
1.5	2.43047	1.59842	2.52969	1.63273	2.51450	1.62752	2.60950	1.65963	2.59495	1.65476
2	2.22607	1.36700	2.24124	1.37194	2.30347	1.39215	2.39099	1.41982	2.37760	1.65476
2.5	2.06860	1.20540	2.15395	1.23171	2.14090	1.22774	2.22265	1.25236	2.21014	1.24864
3	1.94244	1.08485	2.02295	1.10871	2.01063	1.10509	2.08778	1.12743	2.07595	1.12405

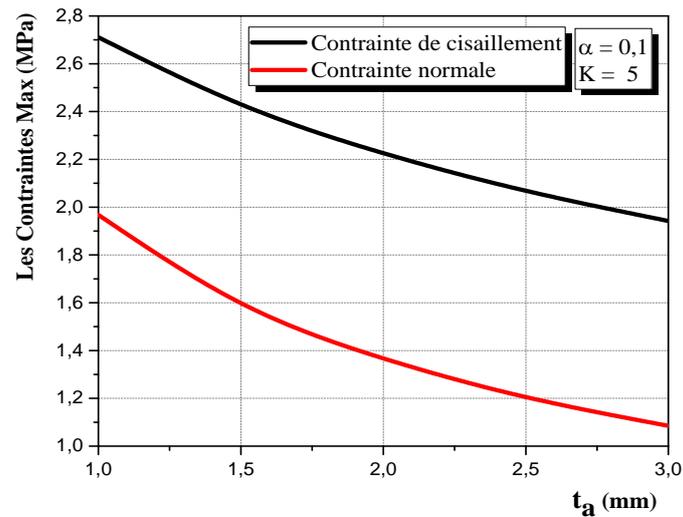


Figure V.4 : Effet de l'épaisseur de la colle t_a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme linéaire).

V.3.1.4. Effet de la longueur a

L'influence de la longueur « a » (longueur entre le bord de la plaque et le support) sur les contraintes les contraintes d'interface maximales est présentée sur la figure (V.5) et tableau (V.6) en utilisant une distribution uniforme linéaire avec $\alpha = 0,1$ et $K = 5$. On constate que, plus la longueur « a » augmente (c'est à dire la longueur de la plaque L_p diminue) plus les contraintes d'interface maximales (contraintes au bord de la plaque) s'accroissent d'une façon significative.

Tableau V.6 : Effet de la longueur a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme linéaire).

a (mm)	Distribution Uniforme $\alpha = 0,1$		Distribution O $\alpha = 0,1$		Distribution V $\alpha = 0,1$		Distribution Inv V $\alpha = 0,1$		Distribution X $\alpha = 0,1$	
	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)
100	0.94101	0.58498	0.98476	0.60075	0.97805	0.59835	1.02022	0.61324	1.01374	0.61097
150	1.28126	0.79206	1.33764	0.81150	1.32900	0.80856	1.38319	0.82684	1.37488	0.82406
200	1.60885	0.99143	1.67737	1.01439	1.66687	1.01092	1.73264	1.03246	1.72256	1.02921
250	1.92380	1.18309	2.00399	1.20943	1.99171	1.20546	2.06859	1.23014	2.05682	1.22641
300	2.22607	1.36700	2.24124	1.37194	2.30347	1.39215	2.39099	1.41982	2.37760	1.41563
350	2.51573	1.54323	2.61782	1.57594	2.60220	1.57102	2.69993	1.60156	2.68497	1.59694

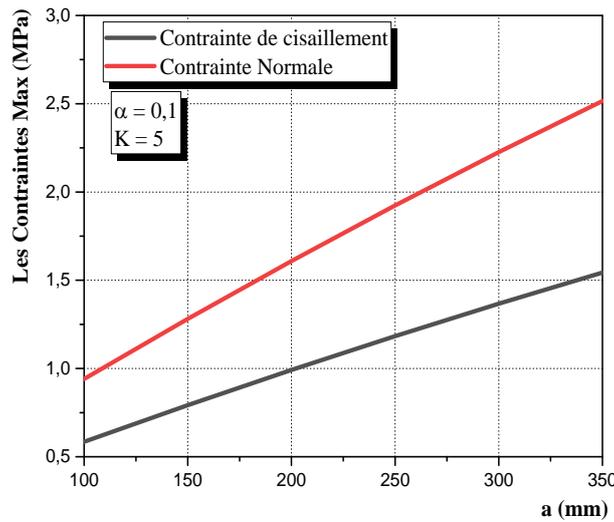


Figure V.5 : Effet de la longueur a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme linéaire).

V.3.1.5. Effet de la rigidité de l'adhésive E_a

L'effet de la rigidité de la colle E_a sur la variation des contraintes d'interface est représenté sur la figure (V.6) et tableau (V.7) en utilisant une distribution uniforme linéaire avec $\alpha = 0,1$ et $K = 5$. L'augmentation de la rigidité de la colle mène à une augmentation significative des contraintes d'interface maximales.

Tableau V.7 : Effet de la rigidité de la colle E_a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme linéaire).

E_a (Mpa)	Distribution Uniforme $\alpha = 0,1$		Distribution O $\alpha = 0,1$		Distribution V $\alpha = 0,1$		Distribution Inv V $\alpha=0,1$		Distribution X $\alpha=0,1$	
	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)
3000	2.22607	1.36700	2.24124	1.37194	2.30347	1.39215	2.39099	1.41982	2.37760	1.65476
4000	2.43018	1.59821	2.44664	1.60394	2.44626	1.60381	2.53484	1.63435	2.53449	1.63424
5000	2.58628	1.79524	2.60375	1.80168	2.60334	1.80151	2.69722	1.83560	2.69686	1.83546
6000	2.71033	1.96740	2.72858	1.97442	2.72816	1.97425	2.82627	2.01141	2.82588	2.01123
6700	2.78323	2.07631	2.80194	2.08367	2.80151	2.08350	2.90210	2.12258	2.90170	2.12242

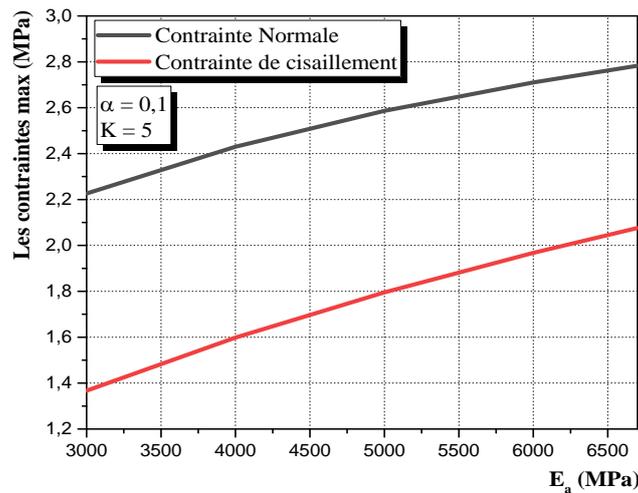


Figure V.6 : Effet de la rigidité de la colle E_a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme linéaire).

V.3.2. Distribution non-linéaire

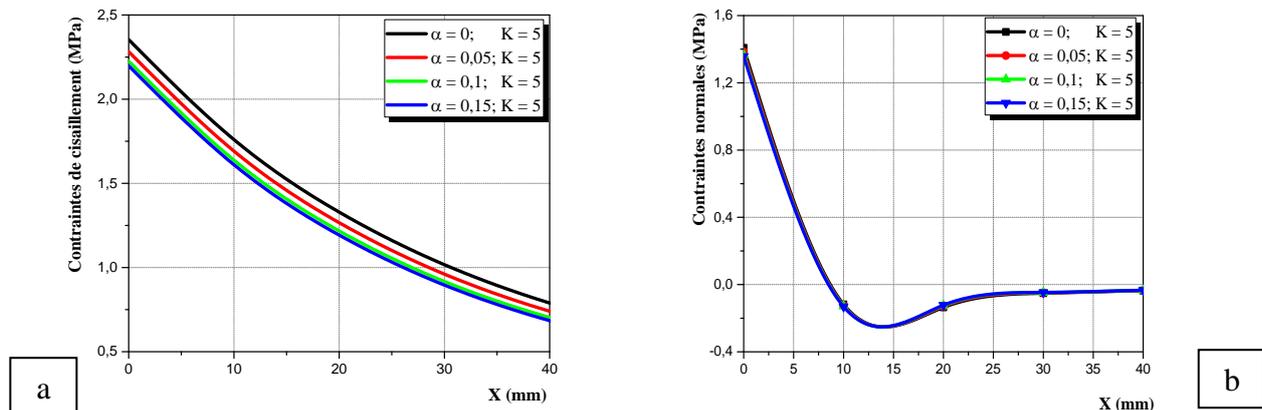
L'une des caractéristiques importantes du FGM poreux est le degré de porosité, c'est-à-dire le pourcentage de vide. Il existe de nombreuses formes de distribution de la porosité non-linéaire nous les mentionnons sur le tableau (V.8).

Tableau V.8 : Différentes formes de distribution non linéaire de la porosité

La forme de distribution	La formule
Distribution uniforme	$E = (E_{11} - E_{22}) * ((\frac{z}{h} + 0.5))^k + E_{22} - (E_{11} + E_{22}) * \frac{\alpha}{2}$
Distribution non linéaire sous forme O	$E = (E_{11} - E_{22}) * ((\frac{z}{h} + 0.5))^k + E_{22} - (E_{11} + E_{22}) * \frac{\alpha}{2} * (1 - 2 * \frac{ z }{h})^2$
Distribution non linéaire sous forme X	$E = (E_{11} - E_{22}) * ((\frac{z}{h} + 0.5))^k + E_{22} - (E_{11} + E_{22}) * \frac{\alpha}{2} * (2 * \frac{z}{h})^2$
Distribution non linéaire sous forme V	$E = (E_{11} - E_{22}) * ((\frac{z}{h} + 0.5))^k + E_{22} - (E_{11} + E_{22}) * \frac{\alpha}{2} * (\frac{1}{2} + \frac{z}{h})^2$
Distribution non linéaire sous forme v inverse	$E = (E_{11} - E_{22}) * ((\frac{z}{h} + 0.5))^k + E_{22} - (E_{11} + E_{22}) * \frac{\alpha}{2} * (\frac{1}{2} - \frac{z}{h})^2$

V.3.2.1. Effet d'indice de porosité α

L'effet d'indice de porosité α sur la variation des contraintes d'interface est représenté sur la figure (V.7) en utilisant une distribution uniforme non-linéaire avec $K = 5$. On constate que l'augmentation d'indice de porosité α conduit à une réduction des contraintes d'interfaces. Cela peut être justifié par le fait que la porosité réduit la rigidité de la plaque et la poutre.



*Figure V.7: Effet d'indice de porosité α sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme non-linéaire).
a) Contrainte de cisaillement, b) contrainte normale*

V.3.2.2. Effet de l'indice de puissance K

L'effet de l'indice de puissance K sur les contraintes d'interface est représenté sur la figure (V.8) et tableau (V.9) en utilisant une distribution uniforme non-linéaire avec $\alpha = 0,1$. On observe l'indice de puissance K influe sur la contrainte de cisaillement d'interface légèrement et la contrainte normale d'interface considérablement (quand l'indice augmente les contraintes diminuent). L'augmentation de l'indice de puissance K mène à une réduction significative des contraintes d'interface maximales.

Tableau V.9 : Effet de l'indice de puissance K sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme non-linéaire).

K	Distribution Uniforme $\alpha = 0,1$		Distribution O $\alpha = 0,1$		Distribution V $\alpha = 0,1$		Distribution Inv V $\alpha=0,1$		Distribution X $\alpha =0,1$	
	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)
0	3.96086	1.80296	4.00877	1.81138	4.01250	1.81205	4.02936	1.81492	4.04318	1.81733
2,5	2.88664	1.56343	2.92197	1.57285	2.92096	1.57257	2.96064	1.58303	2.95535	1.58164
5	2.22607	1.36700	2.27444	1.38277	2.27940	1.38437	2.33241	1.40136	2.33826	1.40322
7,5	1.83030	1.22862	1.92924	1.26486	1.97970	1.28291	2.02454	1.29869	2.06252	1.31189
10	1.66381	1.16493	1.79501	1.21542	1.85854	1.23908	1.91794	1.26077	1.95565	1.27430
20	1.59081	1.13590	1.70485	1.18099	1.78857	1.21300	1.87134	1.24377	1.89708	1.25321

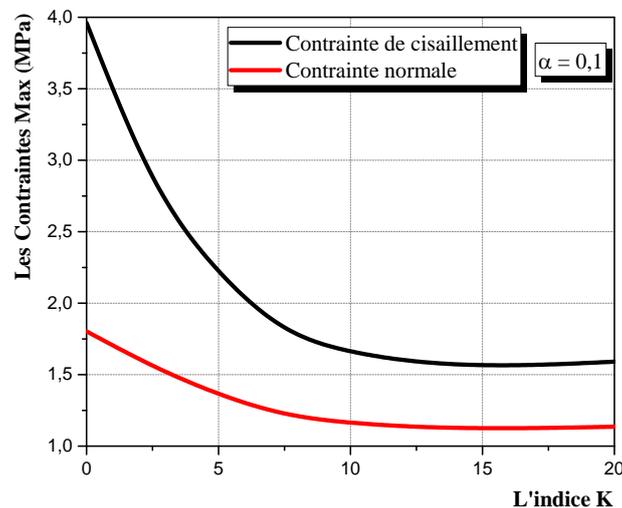


Figure V.8 : Effet de l'indice de puissance K sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme non-linéaire).

V.3.2.3. Effet de l'épaisseur de la colle ta

La variation des contraintes d'interface en fonction de l'épaisseur de la couche d'adhésif est représentée dans la figure (V.9) et le tableau (V.10) en utilisant une distribution uniforme non-linéaire avec $K = 5$ et $\alpha = 0,1$. L'accroissement de l'épaisseur de la couche d'adhésif conduit à une réduction significative des contraintes d'interface maximales. C'est pourquoi, il est fortement recommandé d'utiliser une couche d'adhésif plus épaisse aux voisinages des bords.

Tableau V.10 : Effet de l'épaisseur de la colle t_a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme non-linéaire).

t_a (mm)	Distribution Uniforme $\alpha = 0,1$		Distribution O $\alpha = 0,1$		Distribution V $\alpha = 0,1$		Distribution Inv V $\alpha=0,1$		Distribution X $\alpha =0,1$	
	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)
1	2.71099	1.96792	2.76919	1.99019	2.77516	1.99243	2.83892	2.01639	2.84597	2.01903
1.5	2.43047	1.59842	2.48298	1.61668	2.48838	1.61855	2.54592	1.63823	2.55227	1.64040
2	2.22607	1.36700	2.27444	1.38277	2.27940	1.38437	2.33241	1.40136	2.33826	1.40322
2.5	2.06860	1.20540	2.11378	1.21941	2.11841	1.22084	2.16792	1.23596	2.17340	1.23760
3	1.94244	1.08485	1.98504	1.09754	1.98942	1.09886	2.03612	1.11255	2.04131	1.11405

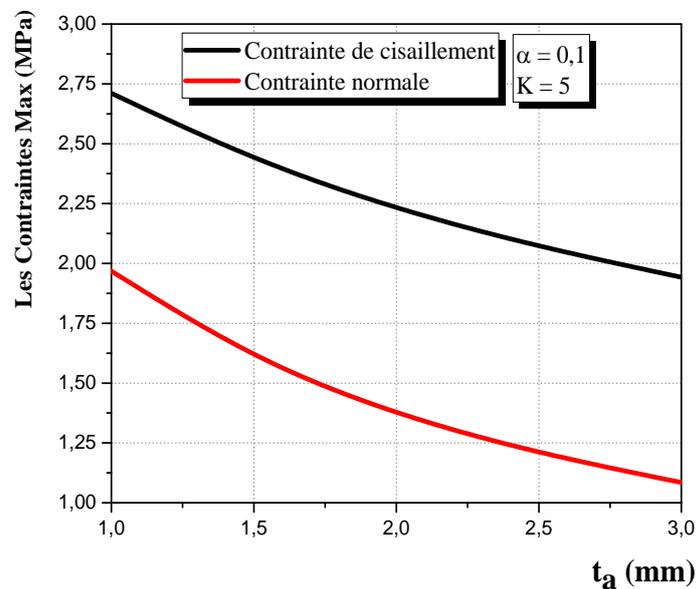


Figure V.9: Effet de l'épaisseur de la colle t_a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme non-linéaire).

V.3.2.4. Effet de la longueur a

L'influence de la longueur non renforcée « a » (longueur entre le bord de la plaque et le support) sur les contraintes d'interface maximales sont représentés dans la figure (V.10) et tableau (V.11) en utilisant une distribution uniforme non-linéaire avec $\alpha = 0,1$ et $K = 5$, A partir des résultats obtenus nous concluons, Plus la longueur « a » augmente plus les contraintes d'interface maximales s'accroissent d'une façon significative, donc il est recommandé de prolonger la plaque de renforcement le plus possible aux appuis.

Tableau V.11 : Effet de la longueur a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme non-linéaire).

a (mm)	Distribution Uniforme $\alpha = 0,1$		Distribution O $\alpha = 0,1$		Distribution V $\alpha = 0,1$		Distribution Inv V $\alpha=0,1$		Distribution X $\alpha=0,1$	
	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)
100	0.94101	0.58498	0.96412	0.59336	0.96650	0.59421	0.99195	0.60329	0.99478	0.60429
150	1.28126	0.79207	1.31106	0.80240	1.31413	0.80345	1.34689	0.81463	1.35052	0.81586
200	1.60885	0.99143	1.64509	1.00364	1.64881	1.00489	1.68860	1.01809	1.69301	1.01954
250	1.92380	1.18309	1.96624	1.19712	1.97059	1.19854	2.01712	1.21368	2.02228	1.21534
300	2.22607	1.36700	2.27444	1.38277	2.27940	1.38437	2.33241	1.40136	2.33826	1.40322
350	2.51573	1.54323	2.56977	1.56066	2.57533	1.56245	2.63453	1.58119	2.64106	1.58324

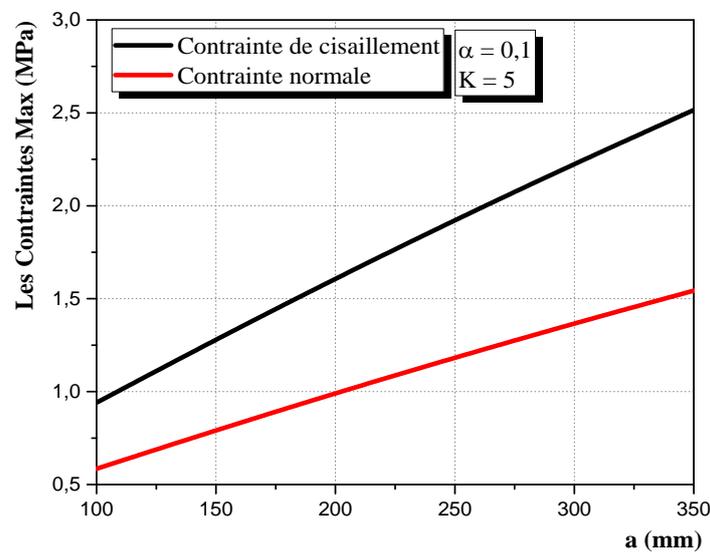


Figure V.10 : Effet de la longueur a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme non-linéaire).

V.3.2.5. Effet de la rigidité de l'adhésive E_a

La couche adhésive est une sorte de matériau isotrope souple et possédant une raideur faible. Cinq valeurs de modules d'Young sont considérées et qui sont 3, 4, 5, 6 et 6,7 GPa. Les résultats numériques représentés dans la figure (V.11) et tableau (V.12) en utilisant une distribution uniforme non-linéaire avec $\alpha = 0,1$ et $K = 5$, montrent que la propriété de l'adhésif influence à peine sur le niveau des contraintes d'interfaces, qu'elles soient normales ou de cisaillement, mais les concentrations de contraintes dans l'adhésif, au bord de plaque, croît avec l'augmentation module d'Young de l'adhésif.

Tableau V.12: Effet de la rigidité de la colle E_a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme non-linéaire).

E_a (Mpa)	Distribution Uniforme $\alpha = 0,1$		Distribution O $\alpha = 0,1$		Distribution V $\alpha = 0,1$		Distribution Inv V $\alpha=0,1$		Distribution X $\alpha = 0,1$	
	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)
3000	2.22607	1.36700	2.27444	1.38277	2.27940	1.38437	2.33241	1.40136	2.33826	1.40322
4000	2.43018	1.59821	2.48268	1.61648	2.48805	1.61831	2.54558	1.63800	2.55193	1.64017
5000	2.58628	1.79524	2.64193	1.81563	2.64763	1.81768	2.70861	1.83967	2.71535	1.84205
6000	2.71033	1.96740	2.76849	1.98964	2.77446	1.99189	2.83817	2.01581	2.84521	2.01846
6700	2.78323	2.07631	2.84286	2.09967	2.84898	2.10206	2.91430	2.12729	2.92152	2.13004

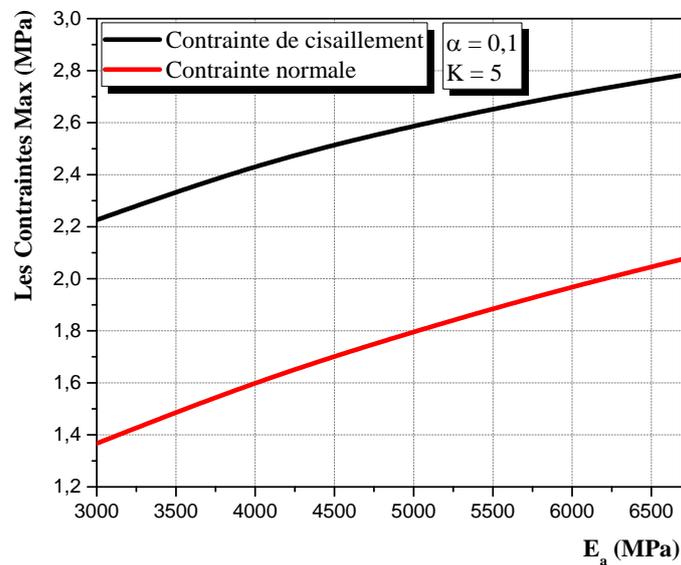


Figure V.11: Effet de la rigidité de la colle E_a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux (une distribution uniforme non-linéaire).

V.4.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'évolution des contraintes de cisaillement et les contraintes normales à l'interface des poutres métalliques renforcées par FGM nous avons comparé aux types des distributions de porosité et ainsi nous avons vu les différents paramètres qui influencent les contraintes d'interface Cette étude paramétrique nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- La diminution de l'épaisseur de la plaque de renforcement diminue les contraintes d'interface.

- L'augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésif réduit l'intensité des contraintes d'interface.
- La diminution de la rigidité de la colle diminue les contraintes d'interface.
- L'augmentation de l'indice de puissance K réduit l'intensité des contraintes d'interface.
- L'augmentation de la porosité réduit l'intensité des contraintes d'interface.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'objet de la présente recherche été le renforcement des ouvrages des poutres métalliques par collage de matériaux composite type FGM poreux. Le souci majeur dans le renforcement par matériaux composites a été toujours le problème de décollement aux extrémités de la plaque, ce qui mène à la ruine de l'ouvrage réhabilité. Cette recherche vient de confirmer et de compléter certains points précédemment menés sur le sujet de réhabilitation des ouvrages métalliques et voir l'effet de la porosité, après une analyse et modélisation des contraintes d'interface des poutres métallique renforcées par des plaques FGM.

Dans notre étude, nous avons présenté une autre solution analytique directe qui détermine les contraintes d'interface au niveau de la couche d'adhésif d'une poutre métallique réparer par matériaux composite type FGM poreux. Le souci majeur dans de telle configuration a été toujours le problème de décollement aux extrémités de la plaque, ce qui mène à la ruine de l'ouvrage réhabilité.

Une étude paramétrique a été réalisée afin de mettre en évidence l'effet des différents paramètres sur la distribution des contraintes d'interface dans une poutre métallique renforcée par une plaque en matériaux composites FGM. Les conclusions tirées de la présente recherche sont les suivantes :

- Les contraintes d'interface sont influencées par les paramètres géométriques tels que l'épaisseur de la couche d'adhésif on constate que l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésif mène à une réduction significative des contraintes d'interface maximales.
- Prolonger le plus possible la longueur de la plaque de renforcement aux appuis, réduit les contraintes aux bords.
- L'augmentation de la porosité réduit l'intensité des contraintes d'interface.
- Le maximum des contraintes d'interface est observé au bord de la plaque puis diminue, rapidement dans le cas des contraintes normales et progressivement pour les contraintes de cisaillement, pour atteindre toutes les deux la valeur zéro à mi travée.

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

- Améliorer la connaissance concernant la fiabilité et la durabilité des structures renforcées par composites (FGM).
- Effectuer des études numériques par des logiciels de modélisations et confronter les résultats qui seront trouvés avec ceux calculés par les modèles analytiques.
- L'augmentation de la porosité réduit l'intensité des contraintes d'interface.
- La diminution de la rigidité de la colle diminue les contraintes d'interface.
- L'augmentation de l'indice de puissance K réduit l'intensité des contraintes d'interface.

Référence bibliographique

[Ameur Mohammed, 2009], Analyse et modélisation des effets de vieillissement des matériaux composites sur les contraintes d'interface des poutres métalliques renforcées par des plaques FRP, Université Djillali Liabes de Sidi Belabbes, thèse doctorat, 2009.

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

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

[Bao et Wang, 1995], International Journal of Solids and Structure 32 (1995) 2853– 2871.

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

[BC.METALNORD,2009], Le rivétage à chaud www.bcmetalnord.com/competences/rivetage

[CAILLEBAUD, JEAN-LOUIS CHABOCHE, 2004], SAMUEL FOREST; HERMES ; PIERRELADEVEZE, JEAN-PIERRE PELLE, Mécanique Non Linéaire, 2004.

[Chedad Abdelbasset, 2015], Analyse des contraintes d'interface d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque en FGM mémoire master université tiaret 2015.

[Delale et Erdogan, 1983]. —The crack problem for a non homogeneous panel. ASME Journal of Applied Mechanics; 50 (3): 609-614.

[Dr. N. BOUMECHRA 2011], Control des constructions métalliques cours master1 génie civil option construction métallique, 2011.

[FAKIRI,2015], Rénovation et réparation des structures métalliques (cas d'étude à Tlemcen) mémoire de master université de Abou bekr Belkaid Tlemcen 2015.

[FAME 2 ,2019], Livre protection des ouvrages métalliques.

[Ferial.Belcadhi, 2015], Soudage de métaux www.usinenouvelle.com/expo/guides-d-achat/machines-de-soudage-87

[Hamelin P. 2002], "Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites". Techniques de l'ingénieur, traité plastique et composite, 2002.

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

[**KADDOURI.Djamel Eddine, 2014**], Analyse des effets de l'amplitude et température sur le comportement non linéaire d'une plaque annulaire sectorielle à gradient fonctionnel université belkaied tlemcen. MAGISTER EN GENIE MECANIQUE 2014.

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

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

[**LOUETRI.LATIFA, 2016**], ETUDE NUMERIQUE DU RENFORCEMENT ETDE LA REPARATION DES SILOS PAR LES MATERIAUX COMPOSITES.

[**MANFERD. H. ROLF BEZ**], Construction métallique: Notions fondamentales et méthodes de dimensionnement, Volume10.

Mécanique des structures et Résistance des Matériaux (Résumé du cours Résistance des matériaux |Chapitre 7: Flambement).

[**MEKSI.RAFIK, 2019**]. INVESTIGATION SUR LES DIFFERENTS COMPORTEMENTS MECANQUES DES STRUCTURES EN MATERIAUX COMPOSITES AVANCES thèse de doctorat 2019 Université Djillali Liabes de Sidi Belabbes.

[**N. KOUIDER 2010**] , Analyse d'éléments de structure métallique à réhabiliter, thèse de magistère de l'université Annaba 2010.

[**Perrier R. et al , 1996**], "Ouvrages d'art utilisant des matériaux composites". IREX, (6), 8-32, 88-114, 1996.

[**PERROT.Y, 2006**], «Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites», thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud, 2006.

[**Ph. Ramondenc SNCF**] Ponts métalliques ferroviaires maintenance, pathologie, réparation.

[**PHILIPPE.BOUILLARD, 2002**], Instabilités, université libre de BEUXELLES, 2002.

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

[**SAID.Abderrahmane, 2016**], Etude et analyse des plaques FGM en Génie Civil thèse doctorat 2016 Université Djillali Liabes de Sidi Belabbes.

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

[**Samuel Tan, 2003**], AlbohassanAstaneh-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, May 2003.

[**Shen, H. S., 2009**], Functionally Graded Materials - Nonlinear Analysis of Plates and Shells, New York: CRC Press.

[**SID, 1969**]. SIDNEY M.JOHNSON, " Dégradation, entretien et réparation des ouvrages du génie civil", Editions Eyrolles, 1969.

[**Simon Nuytten, 2013**], Durabilité de la protection anticorrosion par galvanisation des Structures métalliques. Projet interdisciplinaire à option ENAC Master Génie Civil semestre 2École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Juin 2013 .

[**Techniques de l'Ingénieur, 2002**], C 2 690 Pathologie des structures en acier, 2002.

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

[**Cours MDC II**], université sétif cours MDC II.

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