

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



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

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

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

NASRI Ali Bouabdellah

Sujet du mémoire

***Analyse des contraintes d'interface d'une poutre métallique
renforcée par une plaque en FGM poreux précontraint***

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

Mr, KERROUM Nadir

Président

Mr, RABAHI Abderezak

Rapporteur

Mr, DJEBLI Benyagoub

Examineur

Mr, KRIM Abdallah

Examineur

2022/2023

Sommaire

Liste des tableaux	IV
Liste des figures.....	V
Liste des notations	VII
Résumé	IX
Abstract.....	X
ملخص.....	XI
Introduction générale.....	XII
I.1. Introduction	1
I.2. Pathologies et principales causes des désordres affectant les ouvrages.....	1
I.2.1. Dégradation des matériaux	1
• Erreurs matérielles.....	2
• Au bureau d'études.....	2
• À l'atelier.....	2
• Erreur d'échantillonnage	3
• Au chantier	3
• Causes accidentelles	4
• Actions anormales	4
• Ignorance	4
• Au niveau du projet	4
• Absence ou insuffisance du cahier des charges	5
• Méconnaissance des règlements.....	5
• Méconnaissance des outils informatiques	5
• Erreurs sur les actions	5
• Au niveau de l'exécution.....	5
• Au niveau du montage.....	6

• Manque de coordination entre les intervenants	6
• Méconnaissance de la mise en œuvre	6
I.2.2. Erreurs de conception ou d'études	6
• Arrachement lamellaire	7
• Fissuration à froid.....	7
• Défaut de boulonnages	8
I.2.3. Corrosion.....	10
• Vieillessement par redistribution d'efforts	13
I.3. Conclusion.....	14
II.1 Introduction.....	16
II.2 Techniques de réparation et renforcement des structures métalliques.....	16
II.2.1. Assurer la propreté de l'ouvrage	16
II.2.3. Le zingage	17
II.2.4. Le placage	18
II.2.5. Influence des détails de construction	18
II.2.6. Gainage	19
II.2.7. Réparation par soudage, boulonnage	19
II.2.8. Réparation par rivetage	20
II.2.9. Renforcement par collage de plats métalliques	21
II.2.10. La technique de précontrainte additionnelle	22
II.2.11. Renforcement par collage de plats composites	22
II.2.12. Addition d'éléments structurels complémentaires.....	22
II.2.13. Les différents schémas de renforcement d'une poutre métallique en I	23
II.3. Conclusion	25
III.1. Introduction	32
III.2. Définition du FGM	32

III.2.1. Concept des matériaux fonctionnellement gradués	32
III.2.2. Comparaison des matériaux types FGM et les composites traditionnels	33
III.2.3. Différents types des FGMs:	34
III.2.4. Les principaux avantages et Inconvénients de l'utilisation des FGM.....	34
III.3 Les différentes lois de mélange du FGM.....	35
III.3.1. Fonction puissance P-FGM	37
III.3.2. Fonction exponentielle E-FGM	38
III.3.3. Fonction sigmoïde S-FGM	38
III.4. Conclusion	39
IV.1. Introduction	46
IV.2. Analyse.....	46
IV.2.1. Equations d'élasticité :	47
IV.2.2. La distribution des contraintes de cisaillement dans l'interface composite – Acier	49
IV.3. Résultats Et Discussions.....	51
IV.3.1. Présentation du modèle	51
IV.3.2. Validation du modèle	52
IV.4. L'étude paramétrique	53
IV.4.1. L'effet de la force de précontrainte	53
IV.4.2. L'effet de la longueur non renforcée a	53
IV.4.3. L'effet de rigidité de la colle E_a	55
IV.4.4. L'effet de l'épaisseur de la colle t_a	56
IV.4.5. L'effet de chargement q	57
IV.5. Conclusion.....	59
Conclusion générale	61
Référence bibliographique	

Liste des tableaux

Tableau II. 1 : Différents schémas de renforcement d'une poutre métallique en I 24

Tableau IV.1: chargement et géométrie 51

Tableau IV.2: Propriétés géométriques et mécaniques des matériaux. 52

Tableau IV.4 : L'effet de la longueur non renforcée a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux 54

Tableau IV.5 : L'effet de rigidité de la colle Ea sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux 55

Tableau IV.6 : L'effet de l'épaisseur de la colle ta sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux 56

Tableau IV.7 : L'effet de chargement q sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux 58

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 : Fissuration à chaud</i>	7
<i>Figure I.4 : Arrachement lamellaire</i>	7
<i>Figure I.5 : Fissuration à froid</i>	8
<i>Figure I.6 : Efforts qui exercent dans un assemblage</i>	9
<i>Figure I.7 : Différence entre un boulon pas assez serré et trop serré</i>	9
<i>Figure I.8 : Ovalisation du trou lors du glissement de la pièce.</i>	10
<i>Figure I.9 : Potentiel standard de quelques couples oxydo-réducteurs qui nous intéressent dans cette étude</i>	12
<i>Figure I.10 : Diagramme potentiel-pH (diagramme de Pourbaix) du fer</i>	13
<i>Figure II.1 : Décapage à l'eau</i>	17
<i>Figure II.2 : Renforcement par placage d'une poutre en I</i>	18
<i>Figure II.3 : Soudage à l'arc avec fil fourré</i>	20
<i>Figure II.4 : Rivet constitution d'un assemblage.</i>	21
<i>Figure II.5 : Renforcement par plats métalliques</i>	21
<i>Figure II.6: Différentes méthodes de renforcement par le collage de plaques en composites</i>	22
<i>Figure II.7 : Renforcement d'un portique par une triangulation excentrée</i>	23
<i>Figure II. 8 : Tablier de pont renforcer par matériaux composites</i>	23
<i>Figure III.1 : La distribution composante des matériaux</i>	34
<i>Figure III.2 : Classification matériaux à gradient fonctionnel</i>	34
<i>Figure III.3 : Géométrie d'une plaque FGM.</i>	36
<i>Figure III .4: Variation de la fraction volumique dans une plaque P-FGM</i>	37
<i>Figure III .5 : Variation du module de young dans une plaque E-FGM)</i>	38

Figure III.6 : Variation de la fraction volumique dans une plaque S-FGM 39

Figure IV.1 : Poutre métallique en I simplement appuyée renforcée par une plaque composite..... 47

Figure IV.2 : Un segment différentiel de la poutre métallique renforcée par collage de composite..... 47

Figure IV.3: Validation de la présente méthode en comparant avec la méthode de Rabahi et méthode de benachour..... 52

Figure IV.4: l'effet de la force de précontrainte P sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux 53

Figure IV.5: L'effet de la longueur non renforcée a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux 54

Figure IV.6 : L'effet de rigidité de la colle Ea sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux 56

Figure IV.7 : L'effet de l'épaisseur de la colle ta sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux 57

Figure IV.8 : L'effet de chargement q sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux 58

Liste des notations

- a**: Distance entre l'appui et le bord de la plaque.
- A** : Aire de la section de la poutre métallique.
- α** : Indice de la porosité.
- B**: Coefficients de rigidité de la poutre.
- b0**: Est l'épaisseur de l'âme du profilé en I.
- b1 et b2** : Largeur de la poutre métallique et de la plaque de renforcement respectivement.
- E(z)** : Module de Young de la plaque.
- E1 et E2** : Module d'élasticité de la poutre métallique et de la plaque composite.
- Ea** : Module de Young de l'adhésif.
- E11** : Module de Young de la surface supérieur de la plaque FGM « céramique ».
- E22** : Module de Young de la surface inférieure de la plaque FGM « métal ».
- G1 et G2** : Module de cisaillement de la poutre métallique et de la plaque composite (FGM).
- Ga** : Module de cisaillement de la couche d'adhésif.
- h** : Epaisseur de la poutre [mm].
- I1** : Moment d'inertie de la section de la poutre métallique.
- k** : Est un indice de degré d'homogénéité.
- K** : L'indice de puissance.
- Ks** : Rigidité tangentielle de l'adhésif.
- L** : Longueur de la poutre.
- LP** : Longueur de la plaque de renforcement.
- M(x)** : Moment fléchissant.
- M1(x) et M2(x)** : les moments de flexion appliqués à la poutre métallique et la plaque FGM
- MT(x)** : Moment total appliqué.
- N1(x) et N2(x)**: les forces axiales d'acier et de la plaque composite respectivement.
- q** : Charge répartie.

R : Coefficient de proportionnalité.

t0 : Epaisseur de la semelle du profilé en I.

t1 : Hauteur de la poutre métallique.

t2 : Epaisseur de la plaque composite.

ta : Epaisseur de l'adhésif.

u1 : Déplacement longitudinal à la base de la poutre métallique.

u2 : Déplacement longitudinal à la partie supérieur de la plaque composite.

V(x) : Effort tranchant.

V1(x) et V2(x): Effort tranchant applique dans la poutre métallique et dans la plaque composite.

Vi : Fraction volumique du constituant.

V(z) : Fraction volumique locale

v : Coefficient de Poisson.

y1 et y2 : sont les distances entre la face inférieure de l'adhérent 1 et la face supérieure de l'adhérent 2 et leurs centres de gravite respectifs.

ε1 : Déformation de la poutre métallique.

ε2 : Déformation de la plaque composite (FGM).

τa : Contrainte de cisaillement dans l'adhésif.

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

Résumé

Les éléments structurels métalliques qui subissent des dommages précoces nécessitent soit un renforcement, soit une réparation. Les techniques de renforcement actuellement disponibles incluent les matériaux composites, qui sont devenus un substitut populaire aux matériaux conventionnels en raison de leur résistance exceptionnelle et de leur rigidité spécifique. De plus, les matériaux composites sont privilégiés pour leurs propriétés mécaniques ajustables.

La principale forme de défaillance qui se produit dans les poutres métalliques renforcées est le détachement de la plaque de renfort de la plaque composite et de la poutre. C'est un enjeu important depuis la mise en place des renforts en matériaux composites.

La méthode analytique proposée dans cette étude offre une évaluation précise des contraintes d'interface dans une poutre en acier renforcée par des matériaux composites. Elle peut être utilisée pour optimiser la conception des structures renforcées et pour déterminer le renforcement optimal pour chaque situation. Cette méthode offre donc une alternative efficace aux méthodes conventionnelles d'analyse des contraintes d'interface et peut contribuer à améliorer la durabilité et la sécurité des structures en acier renforcées.

Mots clés : Renforcement et réparation, Matériaux composite, Poutre métallique, Résistance, Plaque renforcé en 'FRP', Réhabilitation.

Abstract

Metal structural elements that suffer early damage require either reinforcement or repair. Currently available reinforcement techniques include composite materials, which have become a popular substitute for conventional materials because of their exceptional strength and specific stiffness. In addition, composite materials are preferred for their adjustable mechanical properties.

The main form of failure that occurs in reinforced metal beams is the detachment of the reinforcing plate from the composite plate and the beam. This is an important issue since the introduction of composite reinforcements.

The analytical method proposed in this study provides an accurate assessment of the interface stresses in a composite reinforced steel beam. It can be used to optimize the design of reinforced structures and to determine the optimal reinforcement for each situation. This method therefore offers an effective alternative to conventional methods of analysing interface constraints and can help improve the durability and safety of reinforced steel structures.

Keywords: Reinforcement and repair, Composite materials, Steel Beam, Resistance, Reinforced plate in 'FRP', Rehabilitation.

ملخص

تتطلب العناصر الهيكلية المعدنية التي تعاني من ضرر مبكر إما التعزيز أو الإصلاح. تشمل تقنيات التعزيز المتاحة حالياً المواد المركبة، والتي أصبحت بديلاً شائعاً للمواد التقليدية بسبب قوتها الاستثنائية وصلابتها المحددة. بالإضافة إلى ذلك، تُفضل المواد المركبة لخصائصها الميكانيكية القابلة للتعديل.

الشكل الرئيسي للفشل الذي يحدث في الحزم المعدنية المقوى هو انفصال لوحة التعزيز من الصفيحة المركبة والشعاع. هذه قضية مهمة منذ إدخال التعزيزات المركبة.

توفر الطريقة التحليلية المقترحة في هذه الدراسة تقييماً دقيقاً للضغوط البينية في شعاع فولاذي مقوى مركب. يمكن استخدامه لتحقيق التصميم الأمثل للهياكل المعززة وتحديد التعزيز الأمثل لكل حالة. لذلك تقدم هذه الطريقة بديلاً فعالاً للطرق التقليدية لتحليل قيود الواجهة ويمكن أن تساعد في تحسين متانة وسلامة الهياكل الفولاذية المقوى.

الكلمات المفتاحية: التعزيز والإصلاح، المواد المركبة، المقاومة، لوح مقوى في "FRP"، إعادة التأهيل.

Introduction générale

Indépendamment de son objectif ou de sa méthode de construction, toute structure doit avoir la capacité de supporter les forces exercées sur elle tout au long de sa durée de vie. Cependant, au fil du temps, les matériaux utilisés dans sa construction se détérioreront inévitablement en raison d'une série de facteurs, notamment des dommages chimiques, physiques ou mécaniques, à la fois locaux et mondiaux. Ces changements finiront par compromettre la capacité de la structure à résister aux forces, un processus communément appelé vieillissement.

Le cadre en acier est connu pour être une plaque tournante des cas pathologiques, qui se présentent sous diverses formes et nombres en raison de la nature complexe de leur structure. Il n'est pas rare qu'une structure métallique subisse des dommages, qui peuvent être attribués à un certain nombre de facteurs. Ces facteurs incluent les défauts de conception et de construction de l'ouvrage, les erreurs commises lors de la phase d'étude et de conception, ou encore l'impact du temps, couplé à d'autres effets rhéologiques comme la corrosion.

La résistance d'une construction est affectée par divers facteurs, qui peuvent la faire diminuer jusqu'à ce que les forces appliquées dépassent la résistance.

Il y a eu une émergence notable du vieillissement semblable à l'acier dans de nombreuses structures d'ingénierie, ce qui a nécessité de nouvelles approches des techniques de construction et des méthodes de réhabilitation. L'entretien de ces structures est essentiel et implique d'assurer une étanchéité et une prévention de la corrosion adéquates, de compenser la perte de rigidité ou de résistance par la réparation et d'améliorer les performances et la durabilité par le renforcement. La question des structures vieillissantes est de plus en plus préoccupante, car le coût des nouvelles constructions augmente et les conditions de réparation deviennent plus difficiles. Par conséquent, l'importance de l'entretien, de la réparation et de la réhabilitation dépasse celle du dimensionnement ou de la construction. Face à ce problème, la technique prometteuse du renforcement par collage de matériaux composites a gagné du terrain.

Dans ces dernières années, l'utilisation des matériaux composites dans la réparation des ouvrages en génie civil est devenue une solution prometteuse et efficace. Cette méthode de réparation consiste à coller des plaques composites sur des poutres.

Cependant, le mode de rupture le plus important de ces poutres renforcées est le décollement de la plaque composite en raison des contraintes d'interface élevées à la proximité du bord de la plaque collée. Des prédictions exactes de telles contraintes sont donc nécessaires pour prévoir ce mode de ruine. Notre travail, présente une méthode analytique pour l'analyse mécanique dans les poutres métalliques réhabilitées par des plaques en composites FGM poreuses. Dans cette étude, la nature anisotropie des matériaux FGM a été prise en compte dans l'analyse théorique en supposant une répartition linéaire des contraintes à travers l'épaisseur de l'adhésif.

Dans ce qui suit on présente les quatre chapitres constituant le mémoire :

CHAPITRE I : décrira, les pathologies des structures métalliques

CHAPITRE II : les différentes techniques de réparation et renforcement des structures métalliques

CHAPITRE III : portera sur les matériaux a gradient de propriété FGM

CHAPITRE IV : on fait une analyse et modélisation des contraintes d'interface dans les poutres métalliques renforcées par des plaques en FGM et les résultats obtenus et les études paramétriques qui influent sur le comportement d'une poutre métallique endommagée réparé par FGM poreux.

Enfin, ce travail est ponctué par une conclusion générale où sont rappelés les principaux résultats obtenus dans cette étude qui permet de souligner son efficacité dans la conception et le calcul relatif au renforcement des structures par matériaux composites et où sont données quelques propositions, en guise de perspectives, pour de futures recherches.

CHAPITRE I

*Pathologies des structures
métalliques*

I.1. Introduction

Une construction, quels que soient sa destination et ses principes de construction, doit pouvoir résister aux efforts imposés au cours de sa vie. Mais au fil du temps, les matériaux de construction subissent diverses altérations et dégradations, locales ou globales, chimiques, physiques ou mécaniques, qui affaiblissent leur résistance. Ce phénomène est généralement appelé vieillissement.

Les structures métalliques sont utilisées dans de nombreux domaines de la construction, de l'industrie et des infrastructures, car elles offrent une grande résistance et une grande durabilité. Cependant, ces structures peuvent être sujettes à des pathologies qui peuvent compromettre leur intégrité structurelle et leur performance.

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

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

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

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

Les pathologies et les désordres qui affectent les ouvrages sont des problèmes courants dans les domaines de la construction, de l'ingénierie civile et de l'architecture. Ces problèmes peuvent être causés par des facteurs

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**)

- *Erreurs matérielles*

Les erreurs matérielles sont l'un des principaux facteurs qui peuvent affecter les structures métalliques. Ces erreurs peuvent être causées par différents problèmes tels que les défauts de fabrication, les matériaux inadéquats, les erreurs de conception, etc. Les erreurs matérielles peuvent entraîner des problèmes

- *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 (**FAKIRI, 2015**)

- *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**.

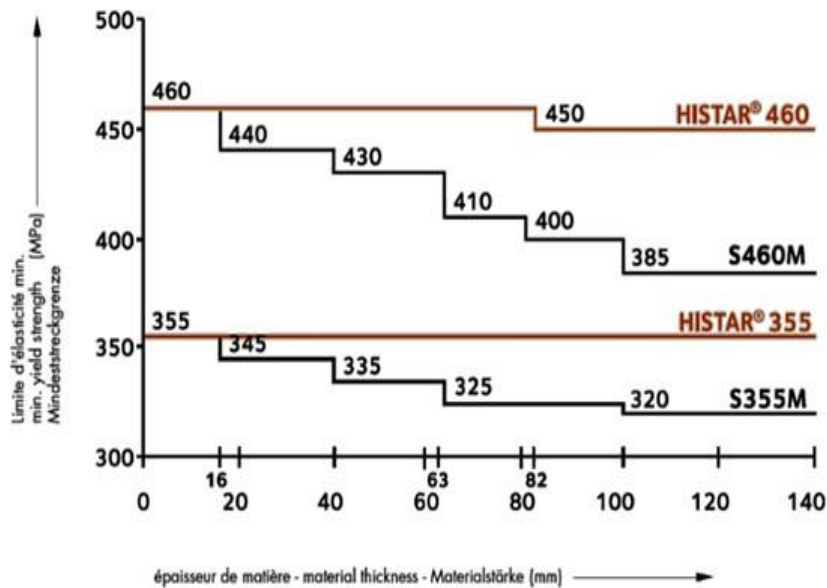


Figure I.1: La limite d'élasticité en fonction de l'épaisseur de l'acier [Simon Nuytten, 2013].

- **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.

- **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	3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9
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].

- **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.**)

- **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.**)

- **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.**)

- **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.**)

- ***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 inexistants. Il importe au projeteur, avant toute étude, de se faire spécifier, par écrit, l'ensemble des hypothèses à retenir. (**FAKIRI, 2015**)

- ***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.**)

- ***Méconnaissance des outils informatiques***

Un logiciel de calcul est un outil d'utilisation souvent délicate. Il faut apprendre à le connaître et à l'utiliser. Les résultats obtenus doivent absolument être contrôlés par des méthodes de comparaison globale. Les limites d'utilisation doivent être respectées. Une erreur dans un jeu de données peut entacher les résultats et avoir de graves conséquences. La modification éventuelle d'un logiciel doit être sévèrement contrôlée et testée. (**Techniques de l'Ingénieur, 2002.**)

- ***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.**)

- ***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.**)

- *Au niveau du montage*

- ✚ *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 incompétence, 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

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. (**Techniques de l'Ingénieur, 2002.**)

- ✚ *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.**)

I.2.2. Erreurs de conception ou d'études

- **Défauts des soudures**

- **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**)

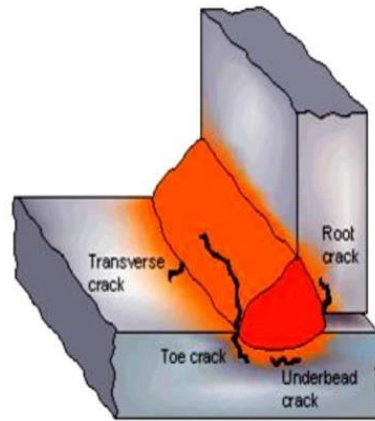


Figure I.3 : Fissuration à chaud [Dr. N. BOUMECHRA, 2011].

- **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)

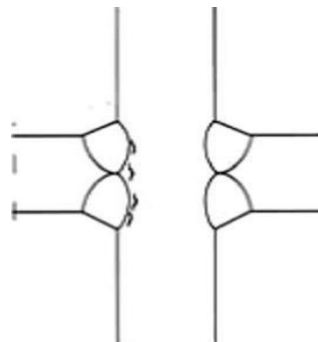


Figure I.4 : Arrachement lamellaire [Techniques de l'Ingénieur, 2002].

- **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)

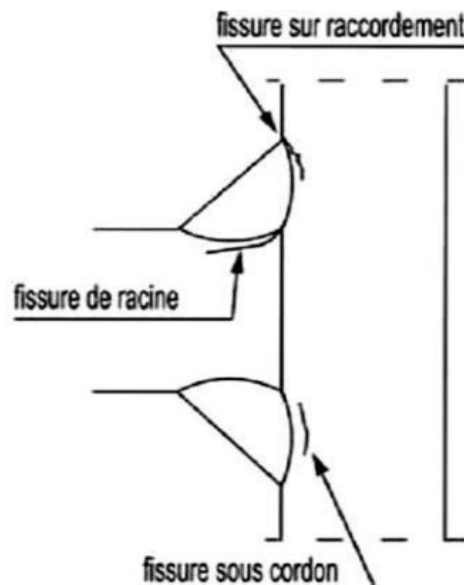


Figure I.5 : Fissuration à froid [Dr. N.BOUMECHRA, 2011].

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.

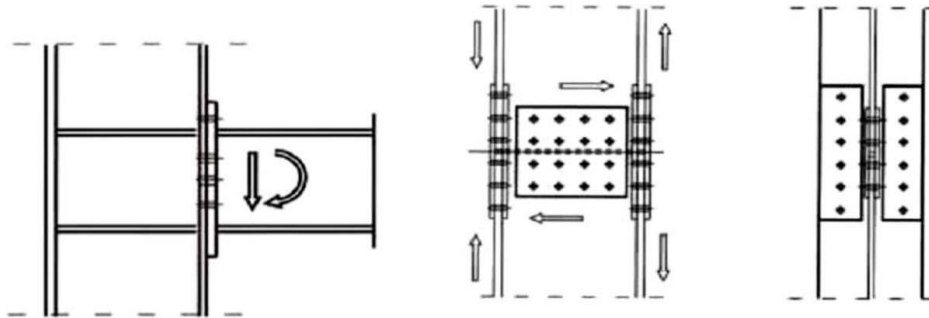


Figure I.6 : Efforts qui exercent dans un assemblage [Dr. N. BOUMECHRA, 2011].

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. (FAKIRI, 2015)

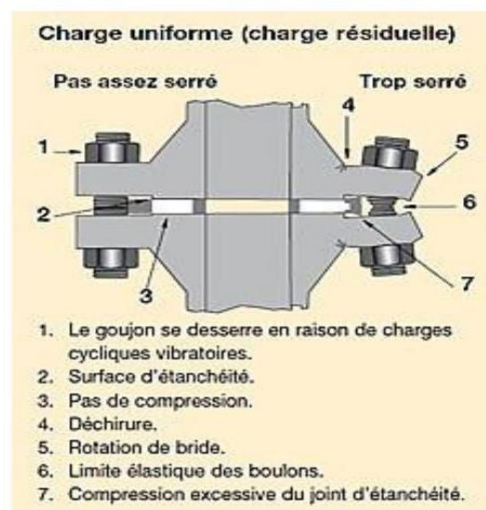


Figure I.7 : Différence entre un boulon pas assez serré et trop serré [PHILIPPE. BOUILLARD, 2002].

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**)

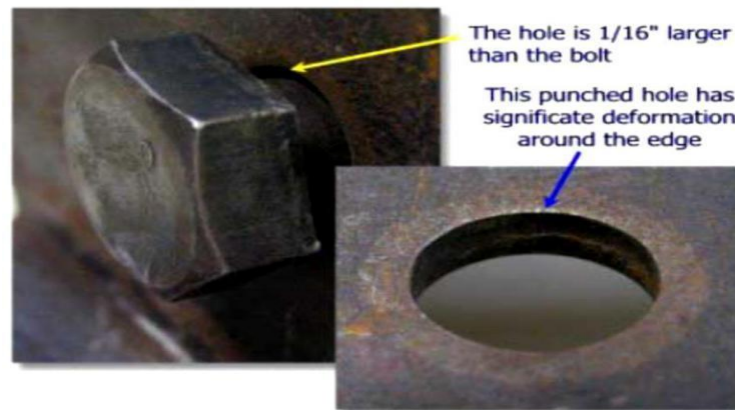


Figure I.8 : Ovalisation du trou lors du glissement de la pièce [Dr. N. BOUMECHRA,2011].

I.2.3. Corrosion



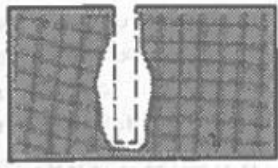
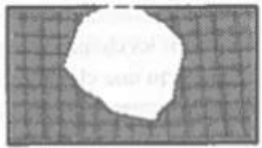
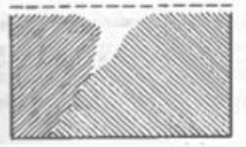
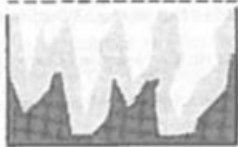
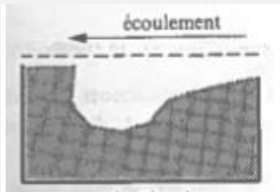
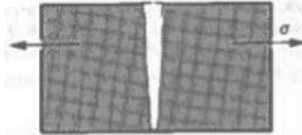
○ Définition

La corrosion est un processus de dégradation des métaux qui résulte d'une réaction chimique avec l'environnement, notamment l'eau et l'air. La corrosion peut affaiblir les métaux et réduire leur durée de vie, ce qui peut avoir des conséquences graves sur la sécurité et la durabilité des structures métalliques. La corrosion peut prendre plusieurs formes, selon les conditions environnementales et la nature des métaux concernés. Les formes les plus courantes de corrosion sont la corrosion uniforme, la corrosion galvanique, la corrosion par piqûres et la corrosion par fissures.

○ 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) (**Nuytten, 2013**)

Tableau I. 1 : Typologie des développements de la corrosion (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.9):

- ✓ 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⁺

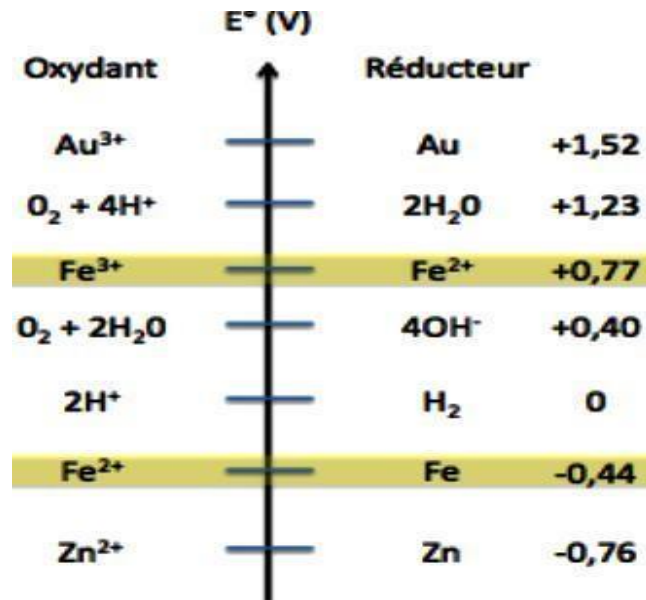


Figure I.9 : Potentiel standard de quelques couples oxydo-réducteurs qui nous intéressent dans cette étude [SimonNuytten,2013].

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.10**). On peut ainsi dire qu'un milieu acide, et dont le potentiel électrochimique est élevé (supérieur à -0,5V) favorise l'oxydation du fer (**FAKIRI, 2015**)

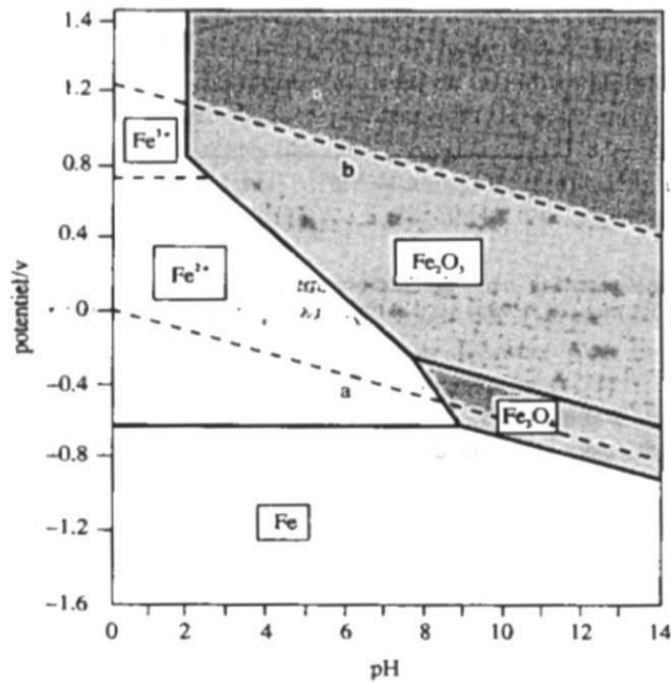


Figure I.10 : Diagramme potentiel-pH (diagramme de Pourbaix) du fer [Simon Nuytten, 2013].

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. (FAKIRI, 2015)

- ***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. (Ramondenc)

I.3. Conclusion

En conclusion, les pathologies des structures métalliques peuvent être causées par différentes raisons telles que les charges anormales, les erreurs de conception ou d'études, les défauts de soudures, la corrosion, et d'autres facteurs. Ces pathologies peuvent réduire la résistance et la durabilité de la structure métallique, augmentant ainsi les risques de défaillance et les dangers potentiels pour les personnes et l'environnement. Il est donc essentiel de confier la conception, la fabrication, l'installation et l'inspection de structures métalliques à des professionnels qualifiés et expérimentés pour garantir la sécurité et la durabilité de ces structures à long terme.

Chapitre II

Les différentes techniques de réhabilitation des structures métalliques

II.1 Introduction

Les structures métalliques sont des éléments clés de nombreuses infrastructures de la société moderne, telles que les bâtiments, les ponts et les tours. Cependant, ces structures peuvent subir des dommages au fil du temps en raison de divers facteurs tels que la corrosion, la fatigue et les charges supplémentaires. La réhabilitation des structures métalliques est donc essentielle pour assurer leur sécurité, leur durabilité et leur capacité portante.

Il existe plusieurs techniques de réhabilitation des structures métalliques, chacune ayant ses propres avantages et inconvénients. Certaines techniques impliquent le renforcement des structures existantes, telles que l'ajout de plaques d'acier ou d'éléments structurels supplémentaires. D'autres techniques consistent à remplacer les éléments endommagés ou à appliquer des revêtements pour protéger la surface des structures contre la corrosion et l'usure. Toutefois, il est important de noter que la réhabilitation des structures métalliques doit être effectuée par des professionnels qualifiés et expérimentés pour garantir la sécurité et la qualité des travaux.

La réhabilitation des structures métalliques est une étape essentielle pour assurer la sécurité et la durabilité des infrastructures modernes. Les différentes techniques de réhabilitation peuvent être utilisées en fonction de l'état de la structure et des objectifs de réhabilitation spécifiques.

II.2 Techniques de réparation et renforcement des structures métalliques

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 (M.JOHNSON, 1969)



Figure II.1 : Décapage à l'eau (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. (M.JOHNSON, 1969)

II.2.3. Le zingage

Le **zingage** est un terme général désignant tout [traitement de surface](#) entraînant la formation d'un revêtement [métallique](#) de [zinc](#). L'objectif est d'empêcher la dégradation du [métal](#) recouvert par [corrosion](#).

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 (M.JOHNSON, 1969)

II.2.4. Le placage

Le placage d'une structure métallique est une technique de réhabilitation qui consiste à ajouter une couche de matériau à la surface de la structure pour la renforcer ou la réparer. Les matériaux de placage couramment utilisés comprennent les composites, les plaques d'acier, Le placage peut être utilisé pour renforcer des éléments structurels tels que des poutres ou des colonnes qui ont subi des dommages ou qui ont besoin d'une capacité portante supplémentaire. Il peut également être utilisé pour réparer des fissures ou des défauts de surface en ajoutant une couche de matériau sur la partie endommagée.

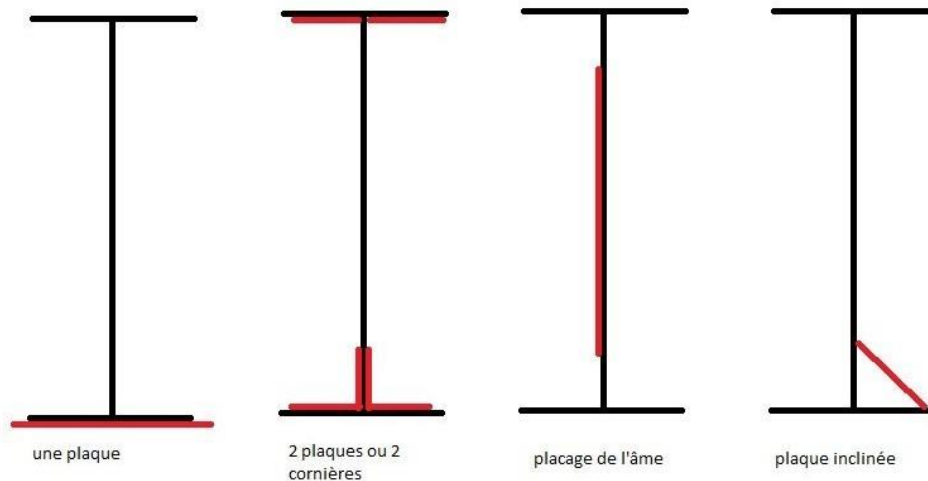


Figure II.2 : Renforcement par placage d'une poutre en I (GUIDES STRRES, 2010)

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
- Il faut éviter les dispositions qui conduisent à des fentes étroites que l'on ne peut ni combler ni peindre.

- Les espaces entourant les éléments en acier doivent être soit ventilés, soit obturés.
(AOUIOUAT, YAHMI, 2020)

II.2.6. Gainage

➤ 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 (M.JOHNSON, 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. (LATIFA, 2016)

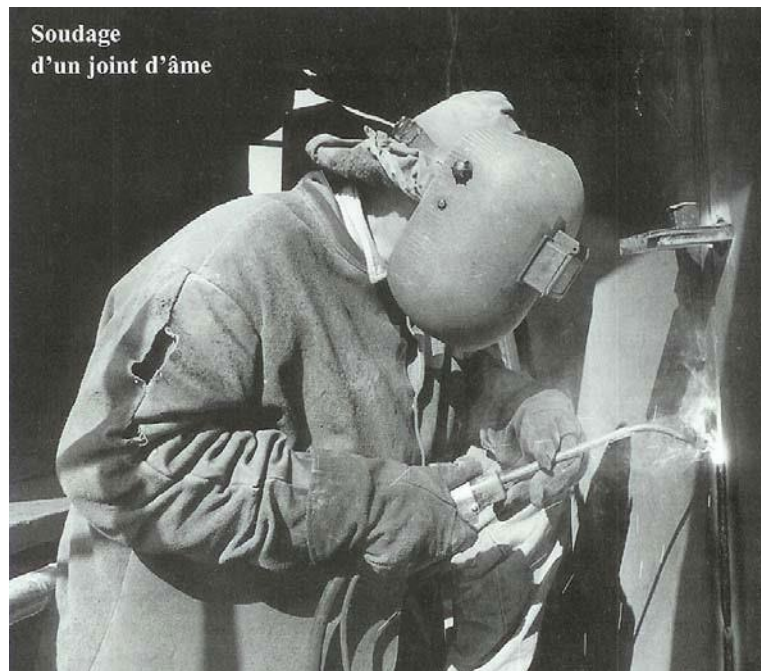


Figure II.3 : Soudage à l'arc avec fil fourré (GUIDES STRRES, 2010)

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 XIX^{ème} siècle et début du XX^{ème}, avant le développement de la soudure, a largement fait appel à ce mode d'assemblage par rivetage.

Le rivetage a constitué le principal mode d'assemblage de pièces métalliques jusqu'au développement de la soudure, qui, avec la technique du boulon à haute résistance, l'ont progressivement remplacé dans les années 1960. Aujourd'hui, cette technique est réservée au domaine de la réparation des ouvrages métalliques anciens rivés (BC.METALNORD, 2009).

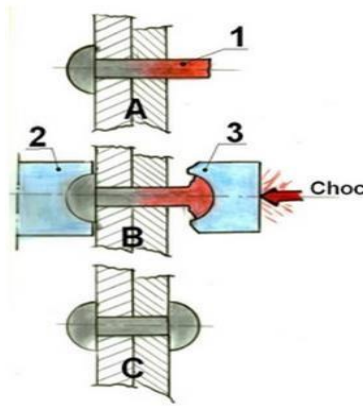


Figure II.4 : Rivet constitution d'un assemblage. [BC METALNORD, 2009]

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. (Salima, 2018)



Figure II.5 : 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)

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.6: 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.7 montrent respectivement le renforcement d'un portique par une triangulation excentrée (AOUIOUAT, YAHMI, 2020)

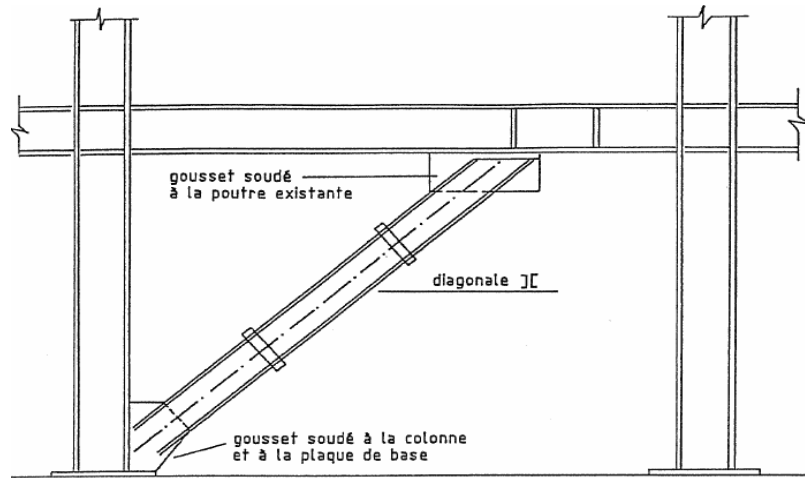


Figure II.7 : Renforcement d'un portique par une triangulation excentrée. [AMEUR Mohammed, 2009].

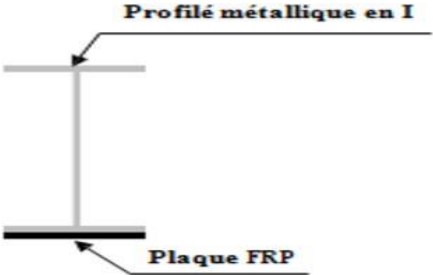
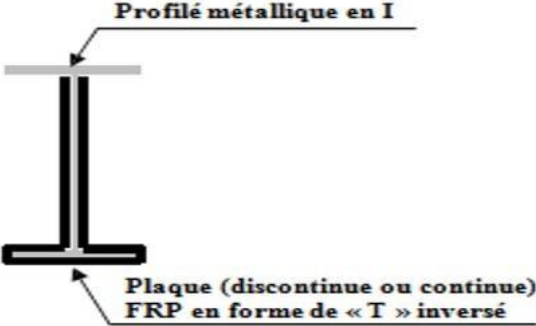
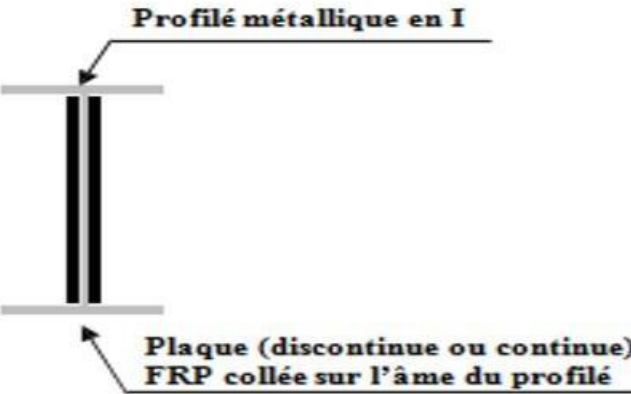
II.2.13. Les différents schémas de renforcement d'une poutre métallique en I

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 (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). (AOUIOUAT, YAHMI, 2020)



Figure II. 8 : Tablier de pont renforcé par matériaux composites [BELBLIDIA Salima, 2018].

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

Schémas de renforcement	objectif
 <p>Profilé métallique en I</p> <p>Plaque FRP</p>	En flexion
 <p>Profilé métallique en I</p> <p>Plaque (discontinue ou continue) FRP en forme de « T » inversé</p>	En flexion et cisaillement
 <p>Profilé métallique en I</p> <p>Plaque (discontinue ou continue) FRP collée sur l'âme du profilé</p>	En cisaillement

II.3. Conclusion

Les techniques de réparation et renforcement des structures métalliques sont très importantes pour garantir la sécurité et la durabilité des bâtiments et des infrastructures. Les structures métalliques peuvent subir des dommages au fil du temps en raison de facteurs tels que la corrosion, la fatigue, les charges excessives, les erreurs de conception ou d'installation, etc.

Les techniques de réparation et renforcement des structures métalliques comprennent des méthodes telles que le renforcement par collage, La peinture ou Le zingage, le renforcement par soudage et boulonnage, Réparation par rivetage, Renforcement par collage de plats métalliques, La technique de précontrainte additionnelle, etc. Ces techniques peuvent être utilisées pour améliorer la capacité portante, la rigidité et la résistance des structures métalliques endommagées ou affaiblies, les techniques de réparation et renforcement des structures métalliques sont essentielles pour garantir la sécurité et la durabilité des bâtiments et des infrastructures. Une exécution professionnelle et adaptée aux besoins spécifiques est cruciale pour assurer l'efficacité et la fiabilité de ces techniques.

Chapitre III

Les matériaux à gradient de propriété FGM

III.1. Introduction

Les matériaux utilisés dans les matériaux à gradient de fonctionnalité (FGM) peuvent varier en fonction de l'application et des propriétés souhaitées. Les FGM sont généralement des composites, c'est-à-dire des matériaux constitués de deux ou plusieurs composants différents qui sont combinés pour obtenir des propriétés uniques.

Les matériaux composites couramment utilisés dans les FGM comprennent les métaux, les céramiques et les polymères. Par exemple, les FGM peuvent être fabriqués à partir de métaux tels que l'aluminium, le titane, le cuivre ou l'acier, qui peuvent être combinés avec des céramiques telles que l'oxyde d'aluminium, le carbure de silicium ou le nitrure de bore pour créer des gradients de propriétés. Les polymères peuvent également être utilisés dans les FGM, tels que les composites renforcés de fibres de carbone (CFRP) qui sont couramment utilisés dans l'industrie aéronautique pour leur légèreté et leur résistance élevée.

III.2. Définition du FGM

Un matériau fonctionnellement gradué (FGM) est un matériau dans lequel la composition et la structure changent graduellement en entraînant une modification correspondante dans les propriétés du matériau. Ce concept de FGM peut être appliqué à divers matériaux pour des utilisations structurelles et fonctionnelles

Il y a plusieurs années, ce concept a été évalué pour la première fois dans le développement de barrières thermiques pour augmenter la résistance thermique des aubes dans les moteurs à turbine à gaz à diverses fins. Les FGM sont créés pour minimiser les contraintes thermiques qui conduisent à la défaillance de la céramique.

La composition des FGM est composée d'une phase céramique d'un côté et d'une phase métallique de l'autre, les régions intermédiaires étant constituées d'un mélange des deux composants, la composition variant en fonction d'un pourcentage volumique. (BELKORISSAT Ismahene, 2015)

III.2.1. Concept des matériaux fonctionnellement gradués

Le concept de « Functionally Graded Material » a été inventé par un scientifique japonais en 1984 qui travaillait sur un matériau capable de tenir à des températures élevées pour des applications spatiales. Le concept a été depuis repris partout dans le monde et on a réalisé l'importance de cette nouvelle famille de matériaux. Le premier congrès international sur les

FGM s'est tenu au Japon (Sendai) en 1991 et le 16ème congrès se déroulera aux Etats Unis en 2021 à Hartford

Le matériau à gradient de propriétés (FGM) est un nouveau concept pour la réalisation de propriétés et / ou de fonctions innovantes qui ne peuvent être obtenues avec des matériaux homogènes conventionnels. Dans sa structure la plus simple, il se compose d'un matériau d'un côté et de l'autre d'un second matériau, et une couche intermédiaire dont la structure, la composition et la morphologie varient doucement d'un matériau à l'autre de l'ordre du micron (Niino M., Hirai T. and Watanabe R, 1987)

Le matériau à gradation d propriétés fonctionnelle (FGM) c'est un matériau révolutionnaire qui appartient à une classe de matériaux avancés avec des propriétés variables sur une dimension changeante (Atai, A. A, Nikranjbar, A. and Kasiri, R, 2012)

III.2.2. Comparaison des matériaux types FGM et les composites traditionnels

Les matériaux composites sont constitués de deux ou plusieurs matériaux combinés qui ont des propriétés qui ne peuvent être obtenues avec aucun des constituants (Jones, R.M, 1999)

Les FGM sont des matériaux contenant des composants différents tels que les céramiques et les métaux. La différence avec les composites c'est que les FGM sont non-homogènes. Dans certains cas, on peut avoir un FGM constitué d'un même matériau mais de microstructure différente (Boch. P Chartier, 1986)

(Yoshihisa Uchida , 2004) à établie un modèle simple illustrant les différences entre les matériaux à gradient de propriétés (FGM) et les matériaux plus conventionnels est montré sur la figure: (a) un matériau plans composé, (b) un matériau relié et (c) un matériau à gradient de propriété. Le matériau plan composé à une caractéristique plane, et le matériau relié à une frontière sur l'interface de deux matériaux. FGM ont de excellentes caractéristiques qui diffèrent de ceux des matériaux plans composés et reliés. Par conséquent, les FGM attirent l'attention en termes de leur application dans les domaines industriels.

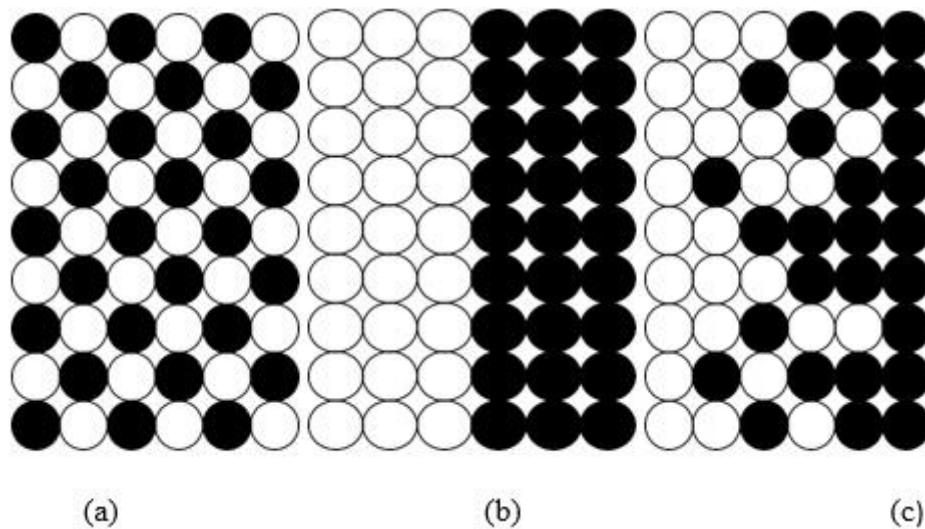


Figure III.1 : La distribution composante des matériaux (Yoshihisa Uchida , 2004)

III.2.3. Différents types des FGMs:

Les FGM peuvent être divisés en deux critères différents sont utilisés pour classer les matériaux à gradient fonctionnel . Le premier critère est repose sur les FGM à structure et deuxième critère est basé sur la taille des matériaux (S.Hamzi, 2021).

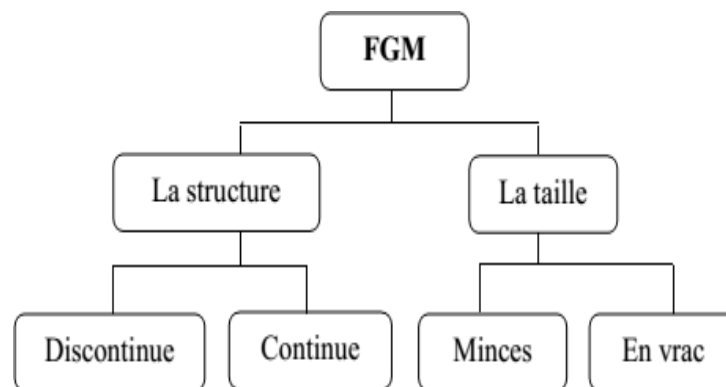


Figure III.2 : Classification matériaux à gradient fonctionnel (S.Hamzi, 2021)

III.2.4. Les principaux avantages et Inconvénients de l'utilisation des FGM

Avantages

- Diminuer les contraintes thermiques causées par les différences de coefficients de dilatation thermique des matériaux utilisés.
- Absence d'une interface nette devrait conduire à un contrôle d'ensemble mieux des contraintes.

- Meilleure cohésion entre différents matériaux, par exemple un métal et une céramique. 4. Extension de la région fonctionnelle avant d'atteindre la valeur limite de la déformation plastique.
- Suppression de délaminage.
- Augmentation de la ténacité à la rupture.
- Elimination des singularités des contraintes à divers endroits, tels que les surfaces libres, des coins, des racines de fissures, etc. (M.ELLALI, 2019)

Inconvénients

- Coûts de fabrication élevés
- Difficulté de réparation : peuvent être difficiles à réparer en raison de la complexité de la structure et de la nécessité d'utiliser des matériaux spécifiques pour chaque couche.
- Limitations de disponibilité : ne pas être largement disponibles sur le marché en raison de la complexité de leur fabrication et des coûts élevés associés.
- Limitations de taille et de forme : Les FGMs ont des limitations de taille et de forme en raison de la complexité de leur fabrication. Les grandes structures FGMs peuvent être difficiles à fabriquer et les formes complexes peuvent être difficiles à réaliser.
- Difficulté de conception : La conception des FGMs peut être difficile en raison de la nécessité de prendre en compte les propriétés des différents matériaux utilisés pour chaque couche et leur distribution à travers l'épaisseur de la structure. (M.ELLALI, 2019)

III.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 :

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_1 \mathbf{V}_1 + \mathbf{P}_2 \mathbf{V}_2 \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$$\mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2 = 1 \quad (\text{III.4})$$

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.

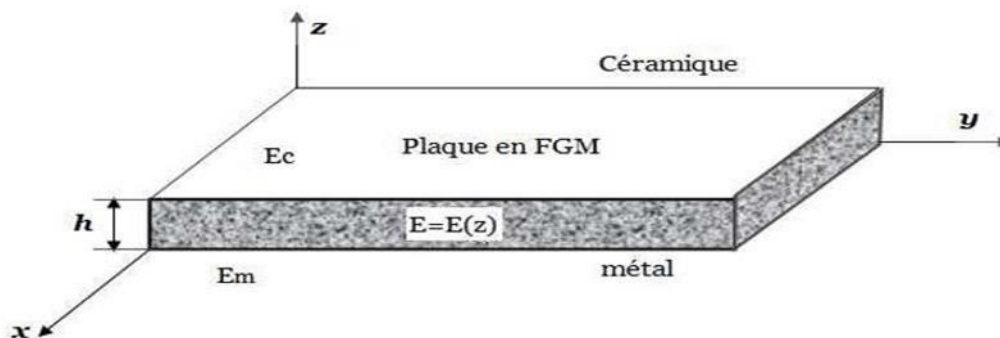


Figure III.3 : Géométrie d'une plaque FGM. [SAID.Abderrahmane, 2016].

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 :

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

[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.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.3). Il apparaît clairement que la fraction volumique change rapidement près de surface inférieure pour « K1 ».

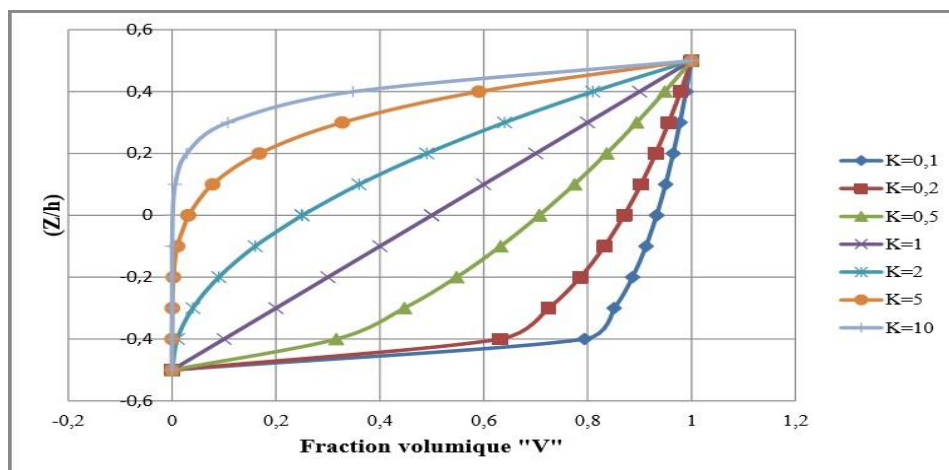


Figure III .4: Variation de la fraction volumique dans une plaque P-FGM (MEKSI.RAFIK, 2019)

III.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)

$$E(z) = E_2 e^{B(z+\frac{h}{2})^1} \quad (\text{III.8})$$

Avec :

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

La variation du module de Young à travers l'épaisseur de la plaque E-FGM est représentée sur la Figure III .5

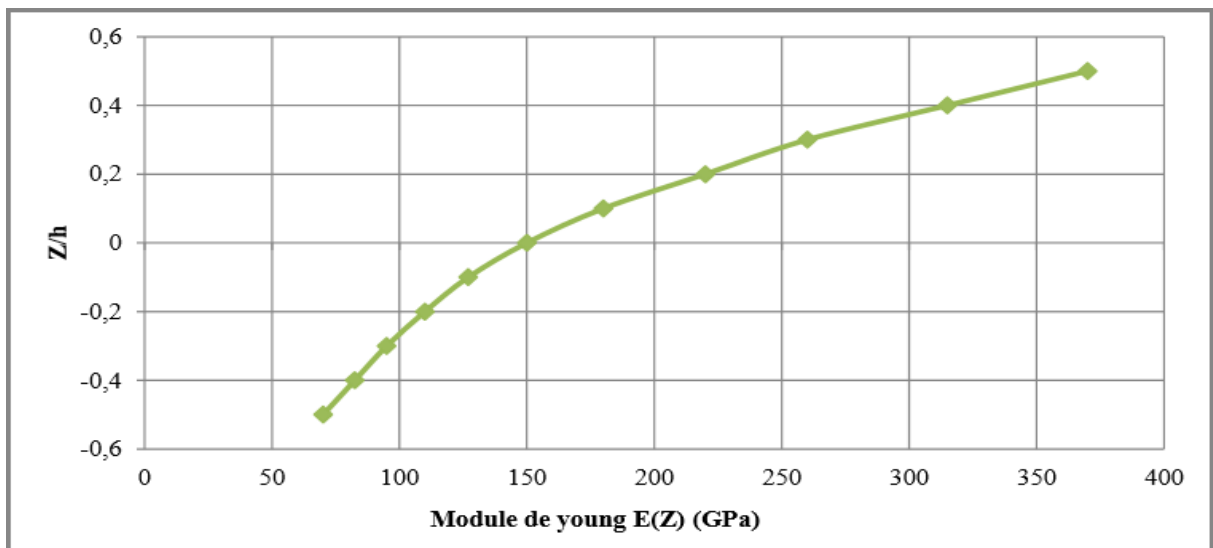


Figure III .5 : Variation du module de young dans une plaque E-FGM (MEKSI.RAFIK, 2019)

III.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 définies par :

$$V_1(z) = 1/2 \quad \text{pour } -h/2 \leq z \leq 0 \quad (\text{III.10.a})$$

$$V_2(z) = 1-1/2 \quad \text{pour } 0 \leq z \leq h/2 \quad (\text{III.10.b})$$

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 .6) 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).

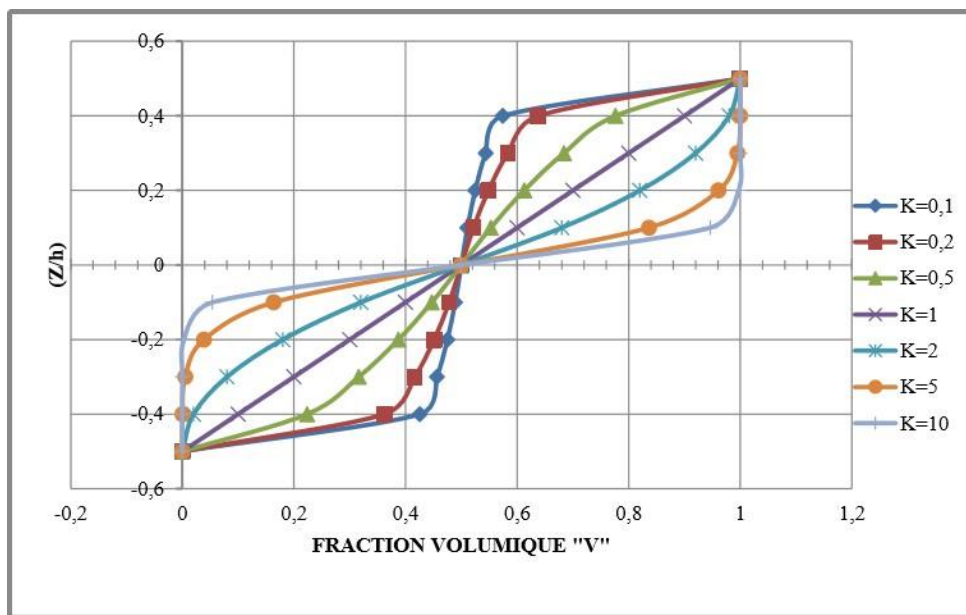


Figure III.6 : Variation de la fraction volumique dans une plaque S-FGM (MEKSI.RAFIK, 2019)

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a fait une définition du FGM avec leur concept et aussi on a fait une comparaison entre matériaux types FGM et les composites traditionnels, et les différents types du FGM. Cette présentation montre les caractères avantageux et Inconvénients du FGM

Et Ainsi nous avons défini les différentes lois de mélange du FGM : Fonction puissance P-FGM Fonction exponentielle E-FGM, Fonction sigmoïde S-FGM.

Chapitre IV

*Analyse et modélisation des
contraintes d'interface pour une
poutre métallique renforcée par
FGM poreux*

IV.1. Introduction

L'analyse et la modélisation des contraintes d'interface sont des aspects importants de la conception de structures renforcées par des matériaux composites. Dans ce contexte, l'utilisation de matériaux composites renforcés par des matériaux poreux, tels que les composites à gradient de porosité (FGM), est de plus en plus courante en raison de leur capacité à améliorer la résistance et la durabilité des structures.

L'utilisation de plaques composites pour reconstruire et revigorer les ouvrages endommagés et les structures métalliques est l'une des façons les plus intelligentes de procéder. En fixant ces plaques sur des pièces et des surfaces usées, nous pouvons leur donner une certaine résistance et durabilité. Mais plus que toute autre chose, l'interface entre la plaque composite et la structure elle-même est ce qui représente la plus grande menace, en raison des contraintes élevées qui semblent se concentrer sur les bords. La façon dont une poutre et une plaque composite interagissent dépend de nombreux éléments, de la géométrie aux propriétés du matériau. En d'autres termes, si vous voulez savoir comment ces deux fonctionnent ensemble, vous devez examiner plus d'un facteur.

Nous avons étudié la poutre, les structures composites et les couches adhésives. Nous les avons examinés de près pour comprendre ce qui les rend différents. Les trois composants sont uniques à leur manière, mais présentent quelques similitudes.

IV.2. Analyse

L'élément dx de la poutre renforcée (Figure IV.1) est représenté sur la (Figure IV.2). Il montre d'une part la contrainte de cisaillement $\tau(x)$ et la contrainte d'interface normale $\sigma(x)$ et d'autre part il représente la conversion de signe pour les moments fléchissants, les efforts tranchants, les efforts normaux et les charges appliquées.

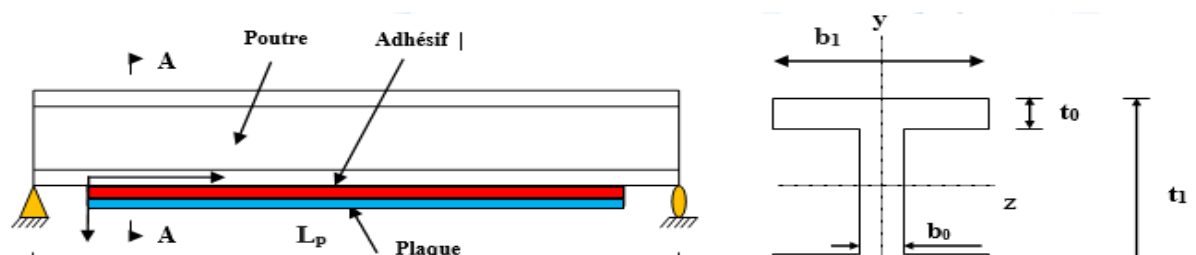


Figure IV.1 : Poutre métallique en I simplement appuyée renforcée par une plaque composite.

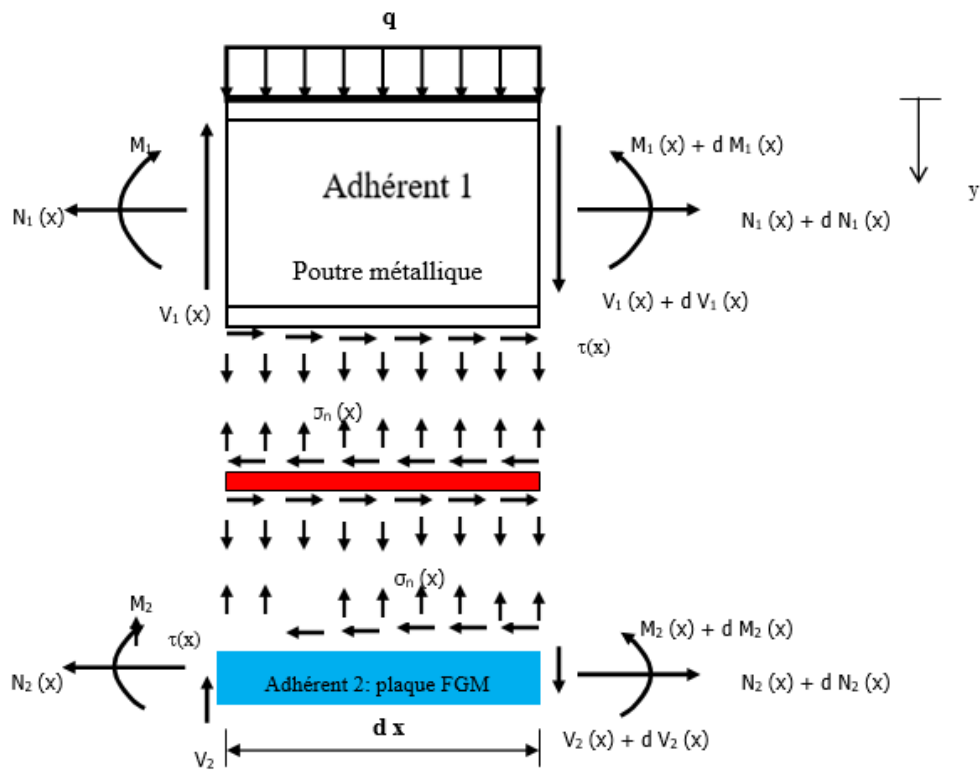


Figure IV.2 : Un segment différentiel de la poutre métallique renforcée par collage de composite

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 :

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1}{E_1 A_1} + \varepsilon \frac{t_1}{4G_2} \frac{dt_1}{dx} \quad (\text{IV.1})$$

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

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 :

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

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

$$\text{Dans la direction } y: \frac{dV_1}{dx} = -[\sigma_n(x)b_2 + qb_2] \quad (\text{IV.4})$$

Où $V_1(x)$ est l'effort tranchant de la poutre métallique, $\sigma_n(x)$ 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 :

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

$$\text{Dans la direction } y: \frac{dV_2}{dx} = \sigma_n(x)b_2 \quad (\text{IV.7})$$

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

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

Considérons ensuite que la raideur de la plaque de raidissement est nettement inférieure à celle de la poutre métallique à raidir. Les moments de flexion dans les plaques FGM peuvent être ignorés pour simplifier la dérivation des contraintes 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 :

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

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 :

$$\frac{d^2 t(x)}{dx^2} = k_s \left[\frac{A'_{11} dN_2(x)}{b_2 dx} - D'_{11} \frac{y_2 dM_2(x)}{b_2 dx} - \frac{y_1 dM_1}{E_1 I_1 dx} + \frac{1 dN_1}{E_1 A_1 dx} - \xi \frac{t_1 d^2 t_a}{4G_1 dx^2} \right] \quad (\text{IV.20})$$

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 :

$$\frac{d^2 t(x)}{dx^2} - K_1 \left(A'_{11} + \frac{b_2}{E_1 A_1} + \frac{(y_1+y_2)(y_1+y_2+t_a)}{E_1 I_1 D'_{11} + b_2} b_2 D'_{11} \right) \tau(x) + K_1 \left(\frac{(y_1+y_2)}{E_1 I_1 D'_{11} + b_2} D'_{11} \right) V_T(x) = 0 \quad (\text{IV.21})$$

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 :

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

- 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 :

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

IV.3. Résultats Et Discussions

IV.3.1. Présentation du modèle

(IV.1) et (IV.2) sont des tableaux des caractéristiques physiques et les propriétés mécaniques des matériaux

Tableau IV.1: chargement et géométrie

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

Tableau IV.2: 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	$b_2 = 150$	$t_2 = 4$	$E_{11} = 380000$ $E_{22} = 70000$	$\nu = 0.3$	$K = 5$
Poutre métallique	$b_1 = 150$ $b_0 = 7.1$	$t_1 = 300$ $t_0 = 10.7$	$E_1 = 210000$	$\nu = 0.3$	Gacier = 80769.2

IV.3.2. Validation du modèle

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

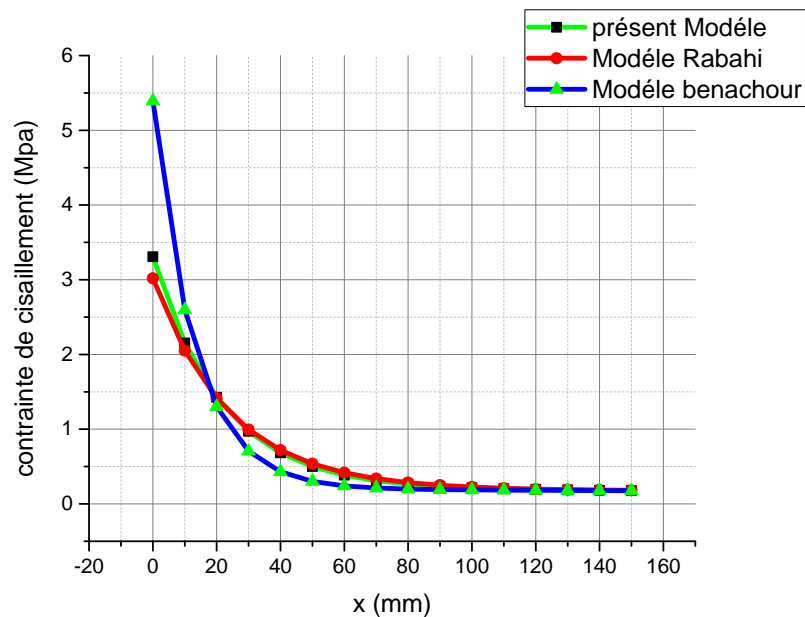


Figure IV.3: Validation de la présente méthode en comparant avec la méthode de Rabahi et méthode de benachour

IV.4. L'étude paramétrique

IV.4.1. L'effet de la force de précontrainte

Dans la figure (IV.4) on présente l'effet de la force de précontrainte P sur la variation des contraintes d'interface. Cette figure montre clairement que les contraintes d'interface (contrainte de cisaillement) sont affectées par la variation de la force de précontrainte P on remarque que tous les force varie vers la même valeur.

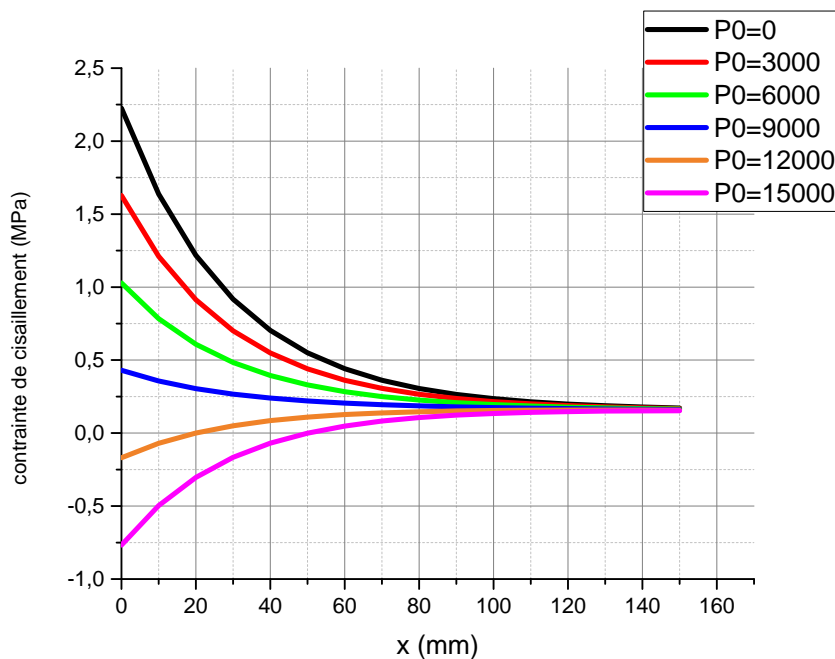


Figure IV.4: l'effet de la force de précontrainte P sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux

IV.4.2. L'effet de la longueur non renforcée a

Dans la figure (IV.5) et le tableau (IV.4) on a l'effet de la longueur non renforcée a sur la variation des contraintes d'interface. En utilisant plusieurs indices de la porosité ($\alpha = 0$, $\alpha = 0.1$, $\alpha = 0.2$, $\alpha = 0.3$) et $K=5$. En variant la force de précontrainte ($P_0=0$ et $P_0=12000$, $P_0=6000$). On remarque que plus la longueur non renforcée « a » augmente, plus la contrainte d'interface (contrainte de cisaillement) augmente également.

Tableau (IV.4) : L'effet de la longueur non renforcée a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux

	a (mm)	$\alpha = 0$	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,2$	$\alpha = 0,3$
P0 = 0	100	1.0022	0.9410	0.9383	1.3511
	200	1.7045	1.6088	1.6045	2.2753
	300	2.3536	2.2261	2.2203	3.1293
	400	2.9498	2.7927	2.7856	3.9130
	500	3.4920	3.3088	3.3005	4.6264
	600	3.9813	3.7742	3.7649	5.2924
P0 = 6000 N	100	-0.1188	-0.2565	-0.2629	0.3626
	200	0.5835	0.4114	0.4034	1.2868
	300	1.2326	1.0286	1.0192	2.1407
	400	1.8285	1.5956	1.5845	2.9244
	500	2.3710	2.1113	2.0994	3.6378
	600	2.8603	2.5768	2.5638	4.2810
P0 = 12000 N	100	-1.2398	-1.4540	-1.4640	-0.6260
	200	-0.5375	-0.7861	-0.7977	0.2981
	300	0.1116	-0.1689	-0.1819	1.1521
	400	0.7075	0.3978	0.3834	1.9358
	500	1.2500	0.9138	0.8982	2.6492
	600	1.7393	1.3793	1.3626	3.2924

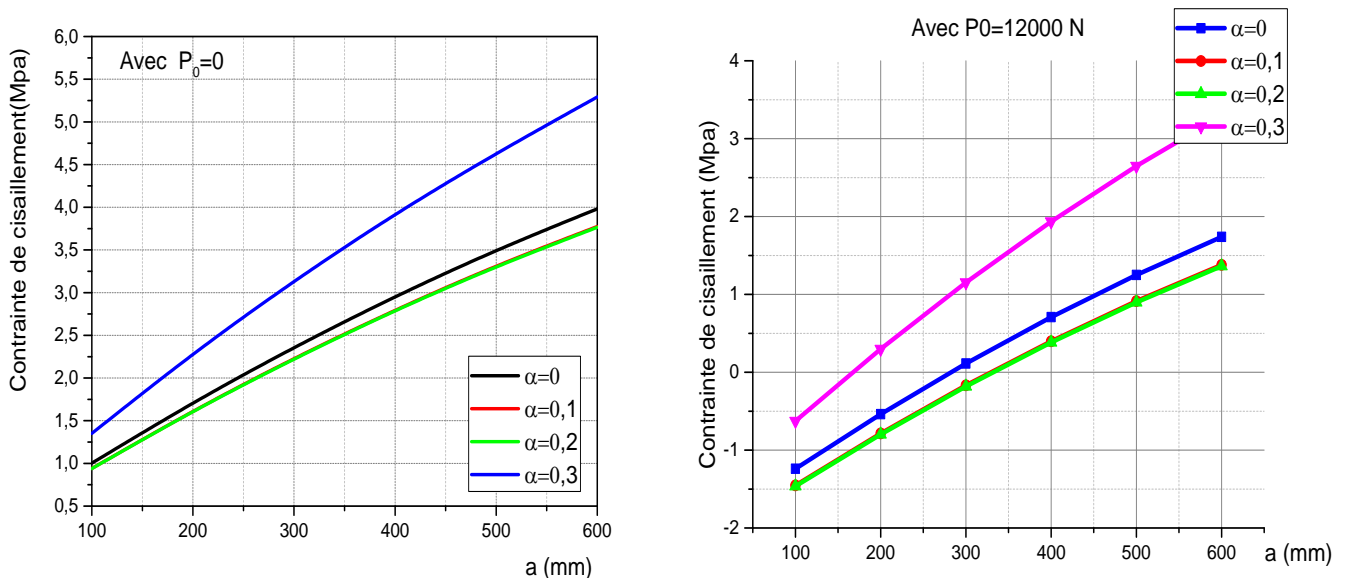


Figure IV.5: L'effet de la longueur non renforcée a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux

IV.4.3. L'effet de rigidité de la colle Ea

L'effet de rigidité de la colle Ea sur les contraintes d'interface maximales sont représentés dans la figure (IV.6) et tableau (IV.5) en utilisant six valeurs de modules d'Young sont considérées et plusieurs Indices de la porosité ($\alpha = 0$, $\alpha = 0.1$, $\alpha = 0.2$, $\alpha = 0.3$) et $K=5$. en utilisant plusieurs force de précontrainte ($P_0=0$ et $P_0=12000$, $P_0=6000$). Montrent que la propriété de la colle influence à peine sur le niveau des contraintes d'interfaces. Et lorsque la rigidité de la colle Ea augmente plus la contrainte d'interface augmente.

Tableau (IV.5) : L'effet de rigidité de la colle Ea sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux

	Ea (MPa)	$\alpha = 0$	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,2$	$\alpha = 0,3$
P0 = 0	1500	1.8539	1.7516	1.7468	2.0580
	3000	2.3536	2.2261	2.2203	2.6077
	4500	2.6559	2.5130	2.5066	2.9401
	6000	2.8637	2.7104	2.7034	3.1685
	7500	3.0168	2.8557	2.8485	3.3369
	9000	3.1348	2.9678	2.9602	3.4666
P0 = 6000 N	1500	0.9917	0.8306	0.8232	1.2978
	3000	1.2326	1.0286	1.0192	1.6192
	4500	1.3782	1.1482	1.1375	1.8133
	6000	1.4782	1.2303	1.2189	1.9467
	7500	1.5518	1.2909	1.2788	2.0450
	9000	1.6086	1.3375	1.3250	2.1208
P0 = 12000 N	1500	0.1296	-0.0903	-0.1005	0.5375
	3000	0.1116	-0.1689	-0.1819	0.6306
	4500	0.1004	-0.2167	-0.2315	0.6865
	6000	0.0927	-0.2497	-0.2656	0.7249
	7500	0.0869	-0.2740	-0.2908	0.7532
	9000	0.0824	-0.2928	-0.3103	0.7749

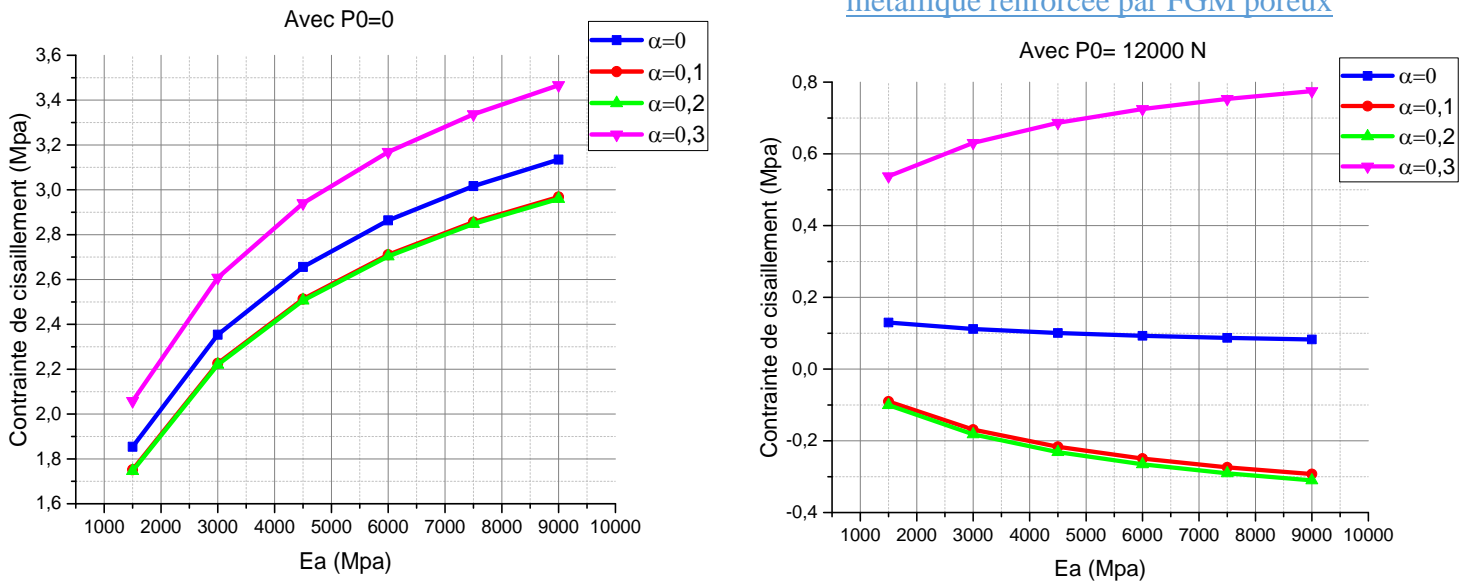


Figure (IV.6) : L'effet de rigidité de la colle Ea sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux

IV.4.4. L'effet de l'épaisseur de la colle ta

La variation des contraintes d'interface en fonction de l'épaisseur de la colle ta est représentée dans la figure (IV.5) et le tableau (IV.6) en utilisant ($\alpha = 0$, $\alpha = 0.1$, $\alpha = 0.2$, $\alpha = 0.3$) et $K=5$. ($P0=0$ et $P0=12000$, $P0=6000$) .et on remarque que lorsque l'augmentation de l'épaisseur de la colle ' ta ' mène à une réduction sur la contrainte de cisaillement .

Tableau (IV.6) : L'effet de l'épaisseur de la colle ta sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux

	ta (mm)	$\alpha = 0$	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,2$	$\alpha = 0,3$
P0 = 0	0,5	3.3068	3.1310	3.1230	3.6560
	1	2.8644	2.7110	2.7041	3.1696
	1,5	2.5688	2.4304	2.4242	2.8446
	2	2.3536	2.2261	2.2203	2.6077
	2,5	2.1878	2.0686	2.0632	2.4252
	3	2.0548	1.9425	1.9374	2.2790
P0 = 6000 N	0,5	1.6914	1.4055	1.3923	2.2314
	1	1.4786	1.2307	1.2192	1.9474
	1,5	1.3363	1.1138	1.1035	1.7576
	2	1.2326	1.0286	1.0192	1.6192
	2,5	1.1527	0.9629	0.9542	1.5125
	3	1.0886	0.9101	0.9020	1.4269
P0 = 12000 N	0,5	0.0761	-0.3200	-0.3384	0.8068
	1	0.0927	-0.2497	-0.2657	0.7252
	1,5	0.1037	-0.2029	-0.2172	0.6705

	2	0.1116	-0.1689	-0.1819	0.6306
	2,5	0.1176	-0.1428	-0.1549	0.5997
	3	0.1224	-0.1219	-0.1333	0.5749

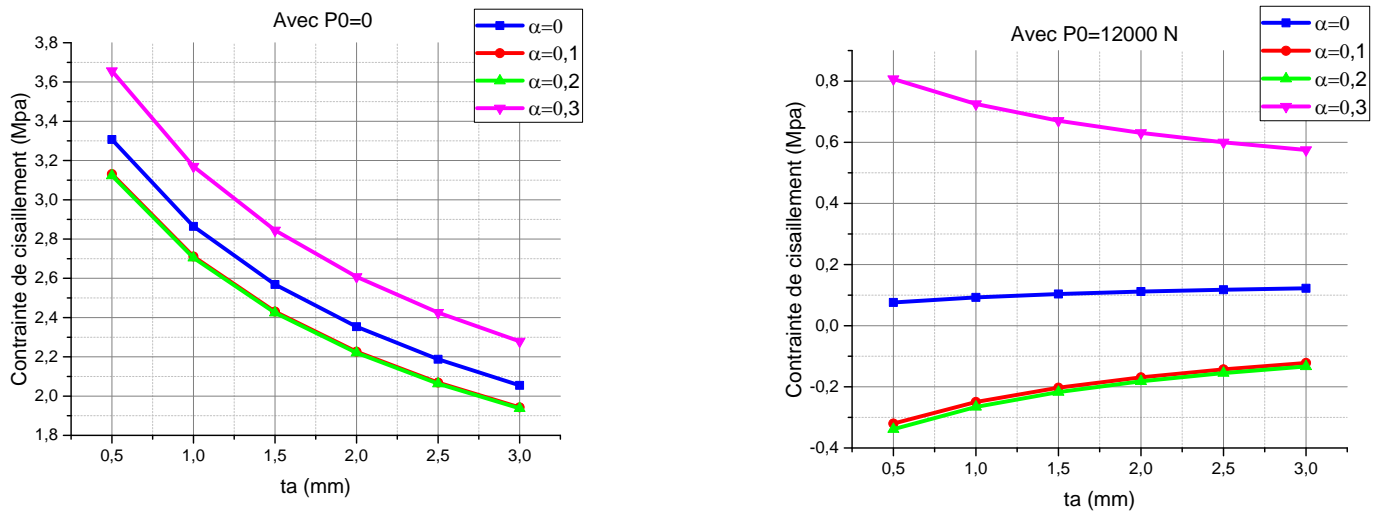


Figure IV.7 : L'effet de l'épaisseur de la colle t_a sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux

IV.4.5. L'effet de chargement q

L'influence de chargement q sur les contraintes d'interface maximales sont représentés dans la figure (IV.8) et tableau (IV.7). six charge sont considérées et qui sont (30,40,45,50,55,60) (KN/m). en utilisant aussi plusieurs Indice de la porosité ($\alpha = 0$, $\alpha = 0.1$, $\alpha = 0.2$, $\alpha = 0.3$) et $K=5$. En utilisant plusieurs force de précontrainte ($P_0=0$, $P_0=12000$, $P_0=6000$) montrent que lorsque augmentation de l'effet de chargement q la contrainte commence à augmenter.

Tableau (IV.7) : L'effet de chargement q sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux

	q (KN/m)	$\alpha = 0$	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,2$	$\alpha = 0,3$
P0 = 0	35	1.6476	1.5583	1.5542	1.8254
	40	1.8829	1.7809	1.7763	2.0862
	45	2.1183	2.0035	1.9983	2.3470
	50	2.3536	2.2261	2.2203	2.6077
	55	2.5890	2.4487	2.4424	2.8685
	60	3.5890	2.6713	2.6644	3.1293
P0 = 6000 N	35	0.5265	0.3608	0.3531	0.8368
	40	0.7619	0.5834	0.5751	1.0976
	45	0.9973	0.8060	0.7972	1.3584
	50	1.2326	1.0286	1.0192	1.6192
	55	1.4680	1.2512	1.2412	1.8799
	60	1.4680	1.4738	1.4633	2.1407
P0 = 12000 N	35	-0.5945	-0.8367	-0.8480	-0.1517
	40	-0.3591	-0.6141	-0.6260	0.1090
	45	-0.1237	-0.3915	-0.4040	0.3698
	50	0.1116	-0.1689	-0.1819	0.6306
	55	0.3468	0.0537	0.0401	0.8914
	60	0.8700	0.2763	0.2621	1.1521

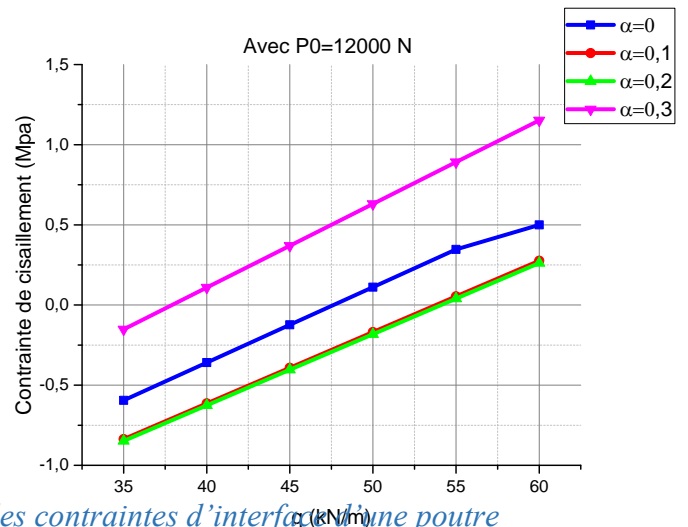
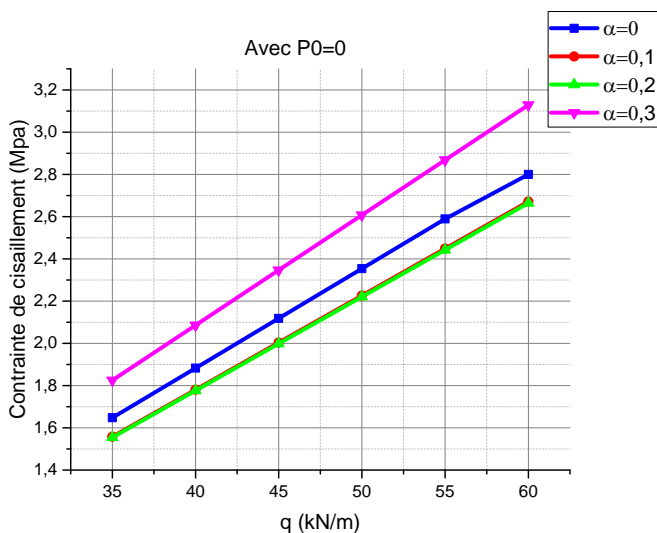


Figure (IV.8) : L'effet de chargement q sur les contraintes d'interface d'une poutre métallique renforcée par FGM poreux

IV.5. Conclusion

Ce chapitre présente une technique de calcul des contraintes cisaillement qui se produisent au niveau de la colle d'une poutre métallique qui a été renforcée avec une plaque FGM. De plus, nos recherches ont exploré les changements dans les contraintes de cisaillement qui se produisent à l'interface des poutres métalliques renforcées par FGM, et nous avons comparé ces résultats avec divers indices de porosité et forces de précontrainte.

Grâce à cette étude, nous avons pu identifier les différents paramètres qui impactent les contraintes d'interface. Sur la base de cette analyse paramétrique, nous sommes arrivés aux plusieurs conclusions par exemple : lorsque la rigidité de la colle E_a augmente plus la contrainte d'interface augmente et augmentation de l'effet de chargement q mène à une augmentation de la contrainte d'interfaceest

Conclusion générale

Conclusion générale

Le but de cette étude était de renforcer des poutres métalliques en appliquant des matériaux composites poreux FGM. Le principal problème avec les matériaux de renforcement utilisant des composites a été le défi du détachement se produisant aux extrémités de la poutre.

La dégradation d'une structure réhabilitée peut souvent être attribuée à un placage défectueux. Des recherches récentes ont confirmé et développé les découvertes précédentes sur le thème de la réhabilitation des structures métalliques, en examinant spécifiquement l'impact de la porosité. A travers une analyse des contraintes d'interface des poutres métalliques renforcées par des plaques en matériau à gradient fonctionnel (FGM), cette étude a complété et réaffirmé certains points.

Notre étude de recherche a introduit une nouvelle approche pour déterminer les contraintes d'interface dans la couche adhésive d'une poutre métallique qui a été réparée grâce à l'utilisation de matériaux composites poreux FGM. Le principal problème qui se pose dans ce type de configuration est le problème de détachement qui se produit aux extrémités de la plaque, ce qui peut entraîner l'effondrement de l'ensemble de la structure réhabilitée.

Afin d'illustrer l'impact de divers paramètres sur la répartition des contraintes d'interface dans une poutre métallique renforcée par une plaque composée de matériaux composites FGM, une analyse paramétrique a été réalisée. Grâce à cette étude, nous avons identifié divers résultats, notamment :

Les caractéristiques géométriques, telles que l'épaisseur de la couche adhésive, ont un impact sur les contraintes d'interface. La recherche montre que lorsque l'épaisseur de la couche adhésive est augmentée, cela entraîne une augmentation des contraintes d'interface.

Il y a eu une diminution notable des contraintes maximales subies à l'interface.

Après avoir mené une étude sur le comportement mécanique des poutres métalliques renforcées par des plaques composites FGM, il a été conclu qu'il était nécessaire de mener des études numériques à l'aide d'un logiciel de modélisation et de comparer les résultats avec ceux calculés par des modèles analytiques. De plus, il a été constaté qu'une réduction de la rigidité de la colle réduit les contraintes d'interface.

Référence bibliographique

- Dr. N.BOUMECHRA. (2011).** Control des constructions métalliques . *cours master1 génie civil option construction métallique.*
- FAKIRI. (2015).** Rénovation et réparation des structures métalliques. *Rénovation et réparation des structures métalliques (cas d'étude à Tlemcen) mémoire de master.* Tlemcen, université de **Abou bekr Belkaid.**
- Hamelin. (2002).** Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites.
- Nuytten, S. (2013, JUIN).** Durabilité de la protection anticorrosion par galvanisation des Structures métalliques. *Projet interdisciplinaire à option ENAC Master Génie Civil semestre 2*École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Ramondenc, P. (s.d.).** Ponts métalliques ferroviaires maintenance, pathologie, réparation.
- Techniques de l'Ingénieur. (2002.).** *Techniques de l'Ingénieur, C 2 690 Pathologie des structures en acier.*, Récupéré sur Techniques de l'Ingénieur.
- Perrier R. et al. (1996).** "Ouvrages d'art utilisant des matériaux composites". *IREX, (6), 8-32, 88-114,*
- 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.* Sidi Belabbes, Université Djillali Liabes : thèse doctorat.
- AOUIOUAT, YAHMI. (2020).** *Renforcement des poutres métalliques par composites type FGM poreux: effet de la forme de distribution.* FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL.
- BC.METALNORD. (2009).** *Le rivétage à chaud .* Récupéré sur www.bcmetalnord.com/competences/rivetage Fargeot. (1997).
- GUIDES STRRES. (2010).** *Réparation et rénovation des structures mettalliques.* france.
- LATIFA, L. (2016).** *ETUDE NUMERIQUE DU RENFORCEMENT ETDE LA REPARATION DES SILOS PAR LES MATERIAUX COMPOSITES.*
- M.JOHNSON, S. (1969).** " *Dégradation, entretien et réparation des ouvrages du génie civil*". Editions Eyrolles.

Salima, B. (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.*

Zhelyazov. (2008). *"Renforcement des structures en béton armé par collage de matériaux composites"*. Reims.: Thèse en cotutelle de doctorat Université.

M.ELLALI. (2019). *Analyse du flambement thermique des matériaux FGM piézoélectriques.* Ain Témouchent.

Niino M., Hirai T. and Watanabe R. (1987). *The functionally gradient materials.*

Atai, A. A. , Nikranjbar, A. and Kasiri, R. (2012). *Buckling and post-buckling Behaviour of semicircular functionally graded material arches: a theoretical study.*

Bao et Wang. (1995). *International Journal of Solids and Structure.*

BELKORISSAT Ismahene. (2015). *Etude de la réponse dynamique des plaques FGM avec la prise en compte de l'effet .* SIDI BEL ABBES.

Boch. P Chartier . (1986). *Huttepain. M Tapa casting of AL2O3/ZrO2 laminated composites.*

Delale et Erdogan. (1983). *The crack problem for a non homogeneous plane|| ASME Journal of Applied Mechanics.*

Jones, R.M. (1999). *Mechanics of Composite Materials.* Taylor & Francis.

MEKSI.RAFIK. (2019). *Investigation sur les différents comportements mécaniques des structures en matériaux composites avancés.* Sidi Belabbes.

S.Hamzi. (2021). *Comportement vibratoire des nanostructures viscoélastiques en composite et matériaux FGM.* Mascara,.

SAID.Abderrahmane. (2016). *Etude et analyse des plaques FGM en Génie Civil.* Sidi Belabbes.

SHEN.H.S. (2009). *Functionally Graded Materials - Nonlinear Analysis of Plates and Shells.* New York: CRC Press.

Yoshihisa Uchida . (2004). *Properties of functionally graded materials, manufactured by Progressive Lamination Method for Applications.*