

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ ABOU BEKR BELKAID-TLEMEN
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



Mémoire de Master en Génie Mécanique

Option

Maintenance Industrielle

Présenté par

HASSAINEMOHAMED

THÈME

**RÉHABILITATION PAR LES FIBRES FRP
DES STRUCTURES DÉGRADÉES**

Soutenu : le mois de Juin 2015

Devant le jury :

Encadreur : Kerboua Bachir

Pr. UABB-Tlemcen

Co-encadreur : Bensaid Ismail

Dr. UABB-Tlemcen

Président : Cheikh Abdelmadjid

Pr. UABB-Tlemcen

Examineur : Hadjoui Fethi

MCB. UABB-Tlemcen

Examineur : Kara Ali Djamel

MCB. UABB-Tlemcen

Invité : Medjdoub Abdelwahed

Ingénieur

Invité : Hadjou Djawad

Ingénieur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2014 - 2015

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
خَلَقَ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ
وَالَّذِي يُضَوِّبُ الْمَاءَ
فَإِذَا حَمَرَ الْمَاءَ
قَالَ سُبْحَانَ اللَّهِ
أَكْبَرُ عَشْرًا
وَالَّذِي يُسْقِطُ
الْمَطَرَ إِنَّهُ رَبُّ
الْعَرْشِ الْعَظِيمِ
اللَّهُمَّ صَلِّ وَسَلِّمْ
وَبَارِكْ عَلَى سَيِّدِنَا
مُحَمَّدٍ وَآلِهِ
الطَّيِّبِينَ الطَّاهِرِينَ
الْبَرَرِيِّينَ
وَالْحَمْدُ لِلَّهِ
الَّذِي جَعَلَ الْقُرْآنَ
أُمَّةً مُبَارَكَةً
لِلْعَالَمِينَ

Remerciements

Tout d'abord, on remercie DIEU pour la force et la patience qu'il m'a accordé pour réaliser ce projet.

Mes sincères remerciements s'adressent du fond du cœur à mon encadreur Mr KERBOUA Bachir Professeur au département de mécanique, faculté de technologie, qui m'a orienté durant toute la préparation de ce projet et qui m'a fourni toutes les informations et les conseils nécessaires, ainsi que pour ses relations humaines.

Je tiens à remercier profondément les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce travail.

Mr Cheikh Abdelmadjid professeur au département de mécanique, faculté de technologie.

Mr Hadjoui Fethi Docteur au département de mécanique, faculté de technologie.

Mr Kara Ali Docteur au département de mécanique, faculté de technologie.

Mes remerciements à Mr BENSALD Ismail Co-encadreur et Doctorant au département de mécanique. J'ai bénéficié, grâce à lui, d'un avantage, non seulement sur le plan scientifique, mais aussi sur le plan humain. Je tiens à lui témoigner toute ma gratitude pour l'aide et le temps précieux qu'il m'a apportés.

DÉDICACES

Je dédie ce travail, au premier lieu, à mes chers parents, qui je ne remercierai jamais assez pour tous ce qu'ils ont fait pour moi et, sans eux je ne serai pas arrivé là ou j'en suis aujourd'hui.

A ma femme et mes enfants Zakaria et Hoda Sanaa

A mes chères sœurs et frères.

A tous mes amis , et à tous ceux qui ont partagé ma joie en ce jour ci.

HASSAINE MOHAMMED

RESUME

RÉSUMÉ

Le renforcement des structures métalliques et non métalliques endommagés en utilisant les matériaux composites en fibre est l'une des méthodes récentes dans le domaine de la réparation et de la réhabilitation des structures existantes, ce qui permet de remplacer les méthodes classiques (soudage, rivetage, boulonnage, etc...). Ces dernières techniques ont prouvé leurs complexités et leurs limites dans le sens de résistance aux efforts et à la corrosion.

Cependant, le phénomène de décollement des plaques FRP de renforcement à leurs extrémités du à une forte concentration des contraintes qui peuvent dépasser la valeur ultime de résistance, et ainsi la structure peut se dégrader et se ruiner de façon partielle ou totale. La connaissance et la prédiction de ces contraintes d'interface joue un rôle majeur dans la compréhension du phénomène de décollement pour éviter tout endommagement.

Dans ce mémoire on s'intéresse à la modélisation de ces contraintes d'interface qui sont la cause du phénomène de délaminage au niveau de la structure, à l'aide d'un code de calcul développé sous « Ansys v.11.0 », tout en tenant compte de l'effet à la fois des charges mécaniques et thermiques dans des structures différentes. La modélisation de la contrainte de cisaillement et de la contrainte normale est très significative pour toute étude de renforcement. De nouvelles approches analytiques vont être développées visant à améliorer les modèles déjà existants, et les résultats obtenus seront comparés avec celles du model numérique qui a été développé dans ce mémoire.

Des études paramétriques vont être réalisées afin de montrer leurs effets sur la concentration des contraintes.

Mots clés: Structure, renforcement, matériaux composites FRP, contraintes interfaciales, décollement, analyse par éléments finis.

Summary

The strengthening of metallic and nonmetallic structures damaged by using fiber composite materials is one of the latest methods in the field of repair and rehabilitation of existing structures, which can replace conventional methods (welding, riveting, bolting, etc. ...). These techniques have proven their complexities and limitations in the direction of stress resistance and corrosion.

However, the separation phenomenon of FRP reinforcement plates at the ends under high concentration of stresses which can exceed the ultimate value of resistance, and so the structure can degrade and ruin of partially or completely. Knowledge or prediction of the interface stress plays a major role in understanding the separation phenomenon to prevent damage.

In this work we are interested in modeling these interface stress that cause delamination phenomena at the level of the structure, using a code developed under “Ansys finite element v.11.0” while taking into account the effect of both mechanical and thermal loads. Modeling lead to determine the shear stress and normal stress concentrated at the end of the reinforcing plate. New analytical approaches have been developed to improve existing models, and to compare with that of the numerical model developed in this study. A parametric study was conducted to show the effects on the stress concentration.

Keywords: structure, reinforcement, FRP composites, interfaciales stress, delamination, finite element analysis.

المخلص

تعزير المعادن الغير حديدية والهياكل التالفة باستخدام الألياف المركبة هي واحدة من أحدث الأساليب في مجال إصلاح وإعادة تأهيل المنشآت القديمة، و التي يمكن أن تحل محل الطرق التقليدية (اللحام، التثبيت بالبراغي، البرشمة، الخ ...). وقد أثبتت هذه التقنيات تعقيدها في مقاومة الإجهاد والتآكل.

المشكلة الأساسية للتقنية الجديدة تكمن في نهايات الهياكل المعززة، حيث تكون نسبة عالية من الإجهادات التي يمكن أن تتجاوز مقاومة المعدن، وبالتالي فإن الهيكل يمكن أن ينهار جزئيا أو كليا.

المعرفة أو التنبؤ بالاجهادات تلعب دورا رئيسيا في فهم ظاهرة الانهيار للهياكل المعززة. في هذه الأطروحة نقوم بدراسة الاجهادات التي تسبب ظاهرة التدهور على مستوى الهيكل، وذلك باستخدام النمودج الملائم.

مع الأخذ بعين الاعتبار تأثير كل من الحمولة و باستعمال اللوح العددي ANSYS لحساب تمركز الاجهادات ، الميكانيكية و الحرارية ، وقد تم تطوير مناهج تحليلية جديدة لتحسين النماذج القائمة لمقارنة النتائج مع النمودج العددي و للحصول على علاقة جيدة بين النماذج.

كلمة البحث:

الإجهادات ، الألياف، عناصر التسليح FRP ، الهيكل، التعزير، المواد المركبة

SOMMAIRE

Sommaire

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES MATERIAUX COMPOSITES	
1.1. Introduction	2
1.2. Présentation générale des matériaux composites	2
1.2.1. Définition d'un composite.....	3
1.2.2. Conception des matériaux composites	5
1.2.3. Caractéristiques des matériaux composites	5
1.2.5. Architecture des matériaux composites.....	7
1.3. Techniques d'assemblage des matériaux stratifiés.....	9
1.4.1. Composites dans l'industrie automobile	10
1.4.2. Composites dans l'aérospatiale	10
1.4.3. Les composites dans la construction navale.....	11
CHAPITRE 2 : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE RENFORCEMENT PAR LES MATERIAUX COMPOSITE EN FIBRE FRP	
2.1. Généralités sur la démarche de diagnostic et de réparation	14
2.2. Méthodes et techniques de réparation et de renforcement des structures	15
2.2.1. Remplacement des éléments endommagés	16
2.2.2. Ajout de matière	16
2.3. Réparation par soudage	17
2.3.1. Introduction	17
2.3.2. Définitions.....	18
2.3. Réparation par boulonnage	19
2.3.1. Généralités.....	19
2.3.2. Catégories d'assemblages boulonnés.....	20
2.4. Réparation par rivetage	21
2.4.1. Généralités	21
2.5. Technique de réparation par collage des tissus composites sur la surface extérieure	22
2.6. Technique de réparation par l'insertion des barres composites avec la technique NSM	25
2.7. Applications des barres composites insérées avec la technique NSM.....	26

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES CONTRAINTES D'INTERFACES SOUS CHARGEMENT	
MÉCANIQUE	
3.1. Introduction	28
3.2. Equations différentielles des contraintes tangentielles d'interface	30
3.3. Equation différentielle des contraintes normales d'interface	32
3.4. Solutions générales	33
3.5. Simulations numériques	34
3.5.1. Modélisation utilisée.....	34
3.5.1. Choix des éléments.....	34
3.6. Résultats et interprétations	35
3.7. Étude paramétrique	37
3.7.1. Effet de l'épaisseur du renfort FRP.....	37
3.7.2. Effet de l'épaisseur de l'adhésif.....	37
3.8. Conclusion	38
CHAPITRE 4 : EFFET THERMIQUE SUR LES STRUCTURES RENFORCÉES PAR COMPOSITE EN FIBRE	38
4.1. Introduction	38
4.2. Fondements théoriques	38
4.3. Distribution de la contrainte normale	42
4.4. Résultats et discussions	43
4.5. Conclusion	47
CONCLUSION GÉNÉRALE	49
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	53

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

Figure1.1 Ruban unidirectionnel carbone / verre sur lequel sont mis en évidence la chaîne et la trame.....	5
Figure 1.2 Différents étapes de formage par moulage d'un matériau composite.....	6
Figure 1.3 : Pli à renforcement unidirectionnel.....	7
Figure1.4 : Constitution d'un stratifié.....	8
Figure 1.5 : Constitution d'un sandwich.....	8
Figure 1.6 : Matériaux à gradient fonctionnel	9

CHAPITRE 2 : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE RENFORCEMENT PAR LES MATERIAUX

COMPOSITE EN FIBRE FRP

Figure 2.1 : Principe d'ancrage de barre de précontrainte.....	18
Figure 2.2 : Soudage à l'arc avec fil fourré.....	20
Figure 2.3 : Principe des assemblages précontraints travaillant au frottement.....	22
Figure 2.4 : Assemblages boulonnés sollicités perpendiculairement à l'axe des boulons.....	23
Figure 2.5 : Assemblage boulonné sollicité parallèlement à l'axe des boulons.....	23
Figure2.6 : Constitution d'un assemblage par rivetage.....	24
Figure 2.7 : Réparation par collage de tôles en acier.....	25
Figure 2.8 : Processus de réparation d'une poutre par le collage du tissu composite en fibre de carbone.....	26
Figure 2-9 : Applications de la technique NSM avec des barres composites (FRP).....	28

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES CONTRAINTES D'INTERFACES SOUS CHARGEMENT MÉCANIQUE

Figure 3.1 : Poutre rectangulaire renforcée par une plaque composite.....	30
Figure 3.2 : Géométrie de la structure en I.....	31
Figure 3.3 : Efforts agissant sur un élément infinitésimal de la poutre renforcée.....	31
Figure 3.4 : Élément Solide 45 (Ansys).....	38
Figure 3.5 . Comparaison entre contraintes d'interfaces la poutre métallique forme I renforcéepar FRP.....	38
Figure 3.6 . Effet de l'épaisseur de la plaque FRP sur des contraintes interfaciales dans une poutre renforcé par FRP.....	39

Figure 3.7. Effet de l'épaisseur de la couche adhésive sur des contraintes interfaciales dans une poutre renforcé par FRP.....40

CHAPITRE 4 : EFFET THERMIQUE SUR LES STRUCTURES RENFORCÉES PAR COMPOSITE EN FIBRE

Figure 4.1. Poutre rectangulaire renforcée par une plaque composite.....43

Figure 4.2. Géométrie de la structure en I.....43

Figure 4.3. Maillage raffiné à l'extrémité de la plaque FRP, poutre rectangle.....48

Figure 4.4. Maillage raffiné à l'extrémité de la plaque FRP cas poutre en I.....48

Figure 4.5. Concentration de la contrainte de cisaillement dans l'adhésive.....50

Figure 4.6. Concentration de la contrainte de décollement dans l'adhésive.....50

Figure 4.7. Comparaison des contraintes d'interface pour une poutre rectangulaire renforcée par une plaque en composite FRP ; chargement thermique.....51

Figure 4.8. Comparaison des contraintes d'interface pour une poutre renforcée par une plaque en composite FRP ; différentes approches : chargement thermomécanique.....51

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES CONTRAINTES D'INTERFACES SOUS CHARGEMENT MÉCANIQUE

Tableau 3.1. Paramètres géométriques et matériels.....37

Tableau 3.2. Paramètres géométriques et matériels de la poutre I en Acier.....37

CHAPITRE 4 : EFFET THERMIQUE SUR LES STRUCTURES RENFORCÉES PAR COMPOSITE EN FIBRE

Tableau 4.1. Paramètres géométriques et matériels.....49

Tableau 4.2. Paramètres géométriques et matériels de la poutre I en Acier.....49

LISTE DES ABRÉVIATIONS

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

A300B : Air France a mis son premier AirbusA300B en service au printemps 1974.

US-Navy : **United States Navy** ou **US Navy** est la marine de guerre des États-Unis et représente l'une des cinq composantes des forces armées des États-Unis.

FRP : Fiber Reinforced Polymer.

CFRP : Carbon Fiber Reinforced Polymer (matériaux composites à base de fibres de carbone)

R 581/1967 de l'ISO : Définition de la soudabilité Genève 1967.

NSM : **Near Surface Mounted** : armatures collées près de la surface « Grouted Reinforcement » (Asplund 1949).

Liste des symboles

(τ) : contraintes d'interface de cisaillement	[MPa]
(γ) : déformation de cisaillement	[MPa]
(u) : déplacements horizontal	[mm]
(w) : déplacements vertical	[mm]
(G_a) : module de cisaillement	[GPa]
(ΔT) la différence de température	[c°]
(t_a) : épaisseur de l'adhésif	[mm]
$N(x)$: effort normal	[N]
$M(x)$: moment de flexion	[N.mm]
y_1 et y_2 : distances séparant les axes neutres de chaque adhérent	[m]
(A_1, A_2) : sections transversales	[m ²]
$(E1, E2, G1, et G2)$: sont respectivement les modules élastiques et de cisaillement de chaque adhérent.	[GPa]
(E_a) : module élastique	[GPa]

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les matériaux composites stratifiés ou sandwichs sont des matériaux à hautes performances mécaniques, façonnables à volonté par le concepteur et sont doués d'un potentiel approprié. Les poutres en composite se développent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines et sont à l'origine de formidables challenges dans diverses réalisations de haute technologie. Ces matériaux sont de plus en plus utilisés dans la conception et la fabrication de pièces mécaniques pour les structures aéronautiques, aérospatiales, maritime, etc. Grâce à leurs excellentes propriétés mécaniques, ils sont soumis à des sollicitations mécaniques et thermiques sévères.

De nombreux travaux de recherche ont traité le comportement mécanique des poutres composites. Ils ont réussi de mettre en évidence l'influence du type de renfort sur les valeurs de la charge et du déplacement à la rupture et l'endommagement au cours du chargement en flexion 3-points en statique et en fatigue de ses stratifiés constituées de fibres de verre, de Kevlar et de résine époxyde.

Notre travail consiste à traiter l'étude comparative du comportement mécanique des structures composites soumises à la flexion. Cette étude est réalisée sur des poutres en matériaux composite symétriques et équilibrés. Les poutres considérées, renforcées par la fibre en verre et dans une résine en époxyde. On cherche alors, à déterminer les contraintes interfaciales (contrainte de cisaillement et contrainte de décollement). Dans ce contexte, en dehors de l'introduction et la conclusion générales, cette étude se décompose en quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les matériaux composites, la mise en œuvre, les techniques de conception et d'assemblage et leurs domaines d'application. Au deuxième chapitre une étude bibliographique sur le renforcement par matériaux composite en fibre FRP et les généralités sur la démarche de diagnostic et de réparation a été établie. Le troisième chapitre présente des résultats numériques obtenus en utilisant la nouvelle approche et leur implication dans la conception pratique dans les structures sous chargement mécanique et de forme variées. Dans le dernier chapitre on a fait une modélisation numérique des contraintes d'interface de la poutre renforcée par la plaque en (FRP). L'originalité dans le modèle adopté et développé, met en évidence une théorie qui tient compte de l'effet thermique des adhérents, chose qui n'a pas été prise en compte par la majorité des études précédentes, en particulier, pour des formes variées de la structure.

CHAPITRE I
GÉNÉRALITÉS SUR LES MATÉRIAUX
COMPOSITES

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES MATÉRIAUX COMPOSITES

1.1. Introduction

La résistance des matériaux a toujours été un critère d'une importance majeure dans la conception des éléments des structures développées par les industries de construction. C'est la première qualité attendue pour le plancher d'une automobile, pour le tablier d'un pont ou pour le fuselage d'un avion. Un autre critère a pris une grande importance : celui de la légèreté des matériaux qui permet de dépenser moins d'énergie pour déplacer les objets qu'ils constituent. Les propriétés mécaniques d'un objet dépendent, bien sûr, de sa forme et de la nature de ses constituants mais également de la façon dont ces derniers sont structurés et assemblés.

Les progrès des matériaux de construction proviennent aussi bien des recherches relatives à leurs compositions chimiques que celles qui concernent les procédés de fabrication, à titre d'exemple, l'aluminium est de plus en plus utilisé car c'est un métal léger. Comme il est peu résistant aux contraintes mécaniques, il faut souvent l'associer à des pièces d'acier pour augmenter sa résistance, mais il s'avère difficile de faire adhérer solidement ces deux métaux l'un à l'autre.

L'emploi de matériaux plus légers sans perte de solidité et sans augmentation importante des coûts de production est devenu le principal enjeu de la compétition actuelle entre Boeing et Airbus. Cet objectif est en bonne partie à l'origine de la création récente des ensembles métalliques et composites complexes, à cette fin, les chercheurs et les ingénieurs tendent à remplacer progressivement les pièces métalliques par des pièces hétérogènes dans lesquelles des fibres de carbone sont noyées dans une matrice en polymère. La présence des fibres renforce la résistance mécanique du matériau le long de son axe principal ; la présence de polymère assure à la fois la cohésion de l'ensemble et la résistance du matériau à des sollicitations transverses.

1.2. Présentation générale des matériaux composites

Contrairement aux matières premières classiques dont on connaît à l'avance les caractéristiques mécaniques, celles des composites ne sont réellement connues qu'après fabrication, car on réalise, en même temps, le matériau et le produit. Actuellement, les composites à matrice organique représentent la majorité des matériaux composites; toutefois, il existe également des composites à matrice inorganique (métallique ou céramique) dont la diffusion reste encore marginale.

L'analyse du comportement des matériaux composites et la prévision de leurs propriétés vont faire intervenir les caractéristiques de la matrice, des fibres, des problèmes d'interface et des conditions de fabrication. En effet, les propriétés mécaniques des composites sont très dépendantes des fibres employées : nature, répartition, taux, longueurs, diamètres, ensimages, etc... Toutefois, les propriétés mécaniques, électriques, chimiques, photochimiques, thermiques sont largement affectées par celles de la matrice (en particulier par les températures de transition et de fusion pour les thermoplastiques) et cela d'autant plus que la fibre est plus courte et en faible proportion. Une bonne connaissance des plastiques renforcés doit donc être fondée sur celle des renforts et des matrices.

1.2.1. Définition d'un composite

Un composite est un matériau artificiel moderne dont la structure est composée de deux constituants ou plus, combinés à une échelle microscopique, et qui ne sont pas solubles entre eux. L'un des constituants est appelé « Renfort » noyé dans l'autre constituant appelé « Matrice ». La phase de renforcement du matériau doit être sous la forme de fibres, particules, ou paillettes. La phase matrice du matériau est généralement continue.

- La matrice :

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

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

- Le renfort :

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

Les Fibres de verre obtenues à partir de la silice et des additifs. Le verre est coulé en fusion

à 1500°C à travers une filière en platine-rhodium ; après refroidissement, les filaments sont étirés pour obtenir des fibres continues de 3 à 20mm. Suivant les applications auxquelles elles sont destinées, les fibres de verre sont réparties en trois qualités :

- Fibre E : pour les composites de grandes diffusions (GD)
- Fibre D : pour les applications dans la construction électrique
- Fibre R : pour les composites hautes performances (HP)

Les fibres de verre constituent le principal renfort, utilisé dans plus de 90% des matériaux composites, et plus particulièrement pour les produits de grande diffusion (GD). Elles offrent un prix raisonnable:

- une bonne adhérence entre fibres et résines (matrices) ;
- des bonnes propriétés mécaniques, mais inférieures à celles de la fibre de carbone;
- des propriétés d'isolation électrique acceptables pour la plupart des applications. En Europe, les fibres de verre sont utilisées principalement dans la plupart des composites « GD » (automobile, construction.) et dans certains composites « HP » avec des fibres de verre « R ».

L'utilisation des fibres de verre dans les composites est principalement limitée par une rigidité insuffisante pour certaines applications comme les pièces de structure primaire en aéronautique ; et pour un vieillissement accéléré au contact prolongé de l'eau, des rayonnements UV ou de températures élevées.

Les fibres de verre utilisées dans les composites ont un diamètre de l'ordre de 10 micromètres, nettement supérieur au diamètre critique (de l'ordre de 3 micromètres) pour que la fibre ne présente pas de risque respiratoire et ne puisse engendrer des cancers.

Les fibres de carbone possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques (spécialement, une excellente tenue en température), une faible masse volumique, et une bonne conductibilité. L'utilisation de la fibre de carbone reste limitée aux secteurs de l'aéronautique, des sports et loisirs, à cause du prix. Cependant, les fibres de carbone souffrent aussi de certains handicaps techniques qui limitent également leur utilisation pour des structures composites tels que:

- L'allongement à la rupture est insuffisant (inférieur à 2%) comparé à celui des fibres de verre et d'aramide (3 à 4%) ; et aussi une caractérisation encore insuffisante pour permettre une conception fiable à prix modéré. Les Fibres aramide 'Kevlar' : sont des polyamides aromatiques, elles ont une mauvaise tenue en compression, mais une bonne résistance au choc et à la fatigue. La fibre d'aramide (on la nomme souvent « Kevlar », qui est la marque de son créateur, (Dupont de

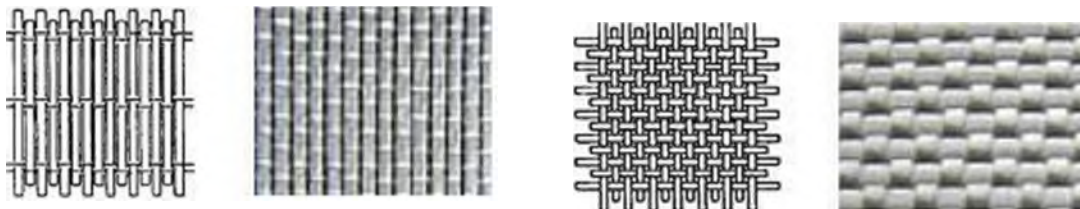
Nemours.) utilisée dans les protections balistiques gilets pare-balles.

En plus de ces deux constituants de base, il faut rajouter : une interface qui assure la compatibilité renfort-matrice, qui transmet les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. Bonne adhérence en couche fine. Des produits chimiques (charges et additifs) entrent aussi dans la composition du composite, l'interphase etc.qui peuvent jouer sur le comportement mécanique, mais n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de la structure composite.

1.2.2. Conception des matériaux composites

On conçoit un composite en fonction du type d'application et de chargement ; ce qui est différent des matériaux classiques où on adapte la conception d'une structure en fonction du matériau constitutif. Pour un composite, on construit sa structure à la demande :

- la nature, la texture, la forme du renfort et son orientation (Figure 1.1)
- le taux de renforcement
- la nature de la résine et des charges ou additifs
- la qualité de l'interface renfort-matrice
- la géométrie de la pièce à réaliser
- le procédé de mise en œuvre utilisé



Armure unidirectionnelle

Armure en toile ou taffetas

Figure 1.1 Ruban unidirectionnel carbone / verre en chaîne trame

On cherchera toujours à orienter au mieux les renforts en fonction des efforts auxquels la structure est soumise pour optimiser le comportement mécanique dans une direction déterminée.

1.2.3. Caractéristiques des matériaux composites

Les matériaux composites se caractérisent des matériaux classiques par un module élevé, une masse volumique faibles, une bonne tenue en fatigue, une absence de corrosion, et ne se plastifient pas. De plus, les formes complexes sont aisément réalisables par moulage, ils vieillissent sous l'action de l'humidité et la chaleur, ils sont insensibles aux

produits chimiques comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants, pétrole (les décapants de peinture attaquent les résines époxydes), mais ils ont une tenue aux impacts et aux chocs très moyenne/matériaux métalliques.

1.2.4 Mise en œuvre des matériaux composites

Les méthodes de mise en œuvre spécifiques aux matières plastiques renforcées ont contribué à l'évolution des termes utilisés pour désigner ces matériaux depuis leur origine, c'est-à-dire depuis une cinquantaine d'années. Des techniques originales ont été élaborées pour la mise en œuvre des composites à fibres longues. La description de ces méthodes spécifiques occupe évidemment une place importante dans la rubrique « Composites ». Trois opérations sont indispensables (Figure 1.2).

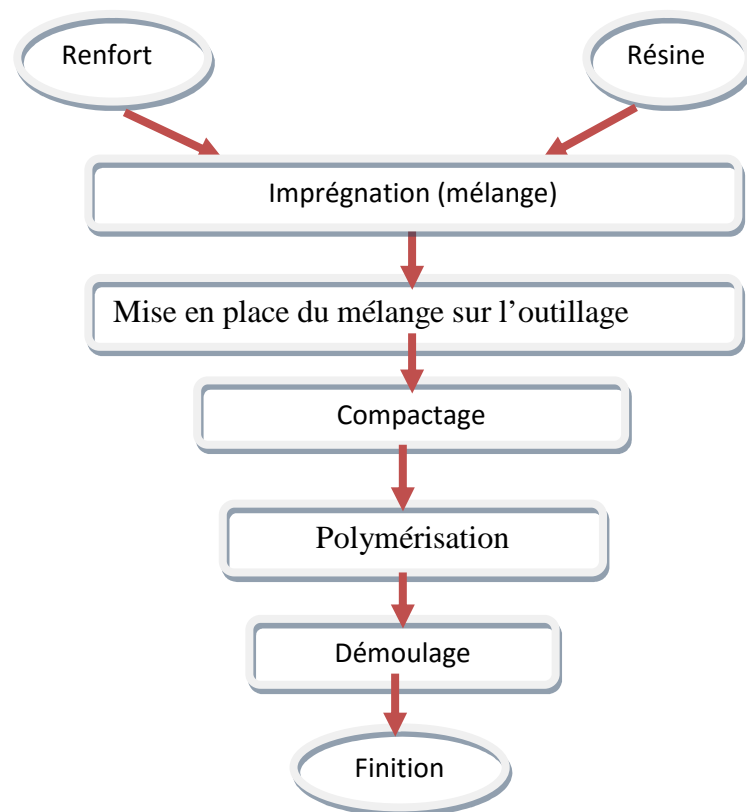


Figure 1.2 Différents étapes de formage par moulage

- Soit par polycondensation et réticulation (ou polymérisation) pour les matrices thermodurcissables, soit par simple refroidissement pour les matières

thermoplastiques. Il existe différentes techniques mais la plus utilisée est par moulage :

Les procédés les plus importants sont :

1. Fabrication par moulage
2. Pultrusion
3. Pultrusion thermoplastique
4. Injection des thermoplastiques renforcés
5. Enroulement filamentaire
6. Enroulement filamentaire thermoplastique
7. Centrifugation
8. Moulage des TRE

1.2.5. Architecture des matériaux composites

a- Monocouches

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types des monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.

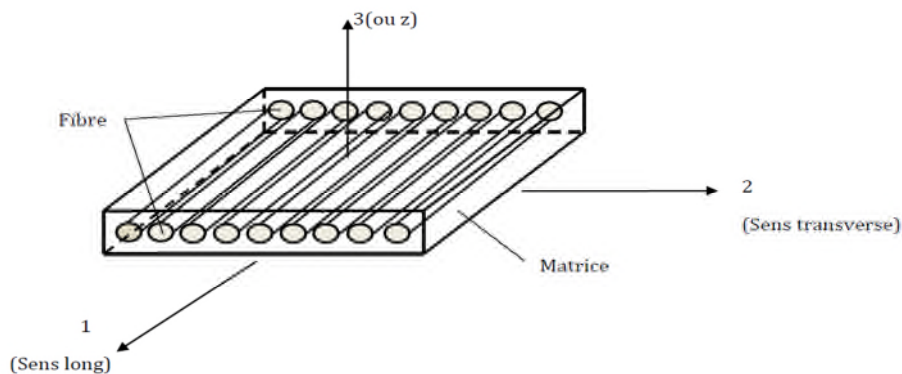


Figure 1.3 Plis à renforcement unidirectionnel

b- Stratifiés

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacune une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches, et désigné comme le référentiel du stratifié (Figure 1.4). Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques. On pourra avoir des stratifiés du type :

1. Equilibré : stratifié comportant autant de couches orientées suivant la direction $(+\Theta)$ que de couches orientées suivant la direction $(-\Theta)$.
2. Symétrique : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport

à un plan moyen.

3. Antisymétrique : stratifié comportant des couches disposées non symétriquement par rapport à un plan moyen.

4. Croisé : stratifié comportant autant de couches à 0° que de couches à 90° .

5. Hybride : les couches successives comportent des fibres de natures différentes, il s'agit d'un stratifié hybride.

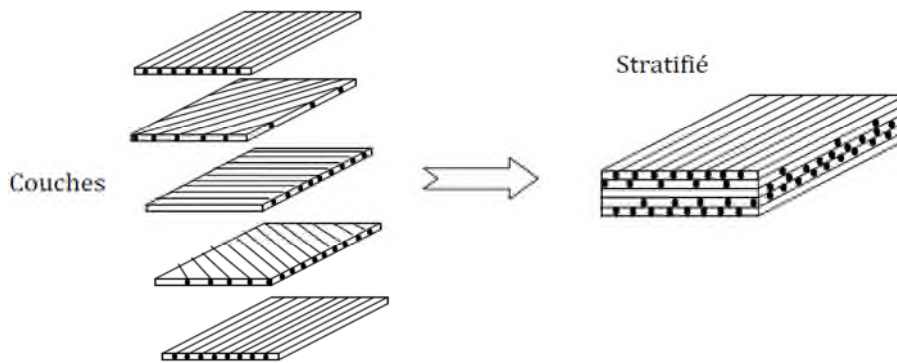


Figure1.4 Constitution d'un stratifié

c- Sandwich

Les matériaux sandwichs résultent généralement de l'association de deux semelles ou peaux de faible épaisseur, constituées de matériaux à haute résistance et haut module, et d'une âme beaucoup plus épaisse et de faible densité (Figure 1.5). Ils ont pour avantages: une grande rigidité, une résistance à la rupture élevée associée à un faible poids par unité de surface. Malgré une activité de recherche et de développement sur ces matériaux, le comportement au cours de l'endommagement reste peu connu. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et un excellent isolant thermique.

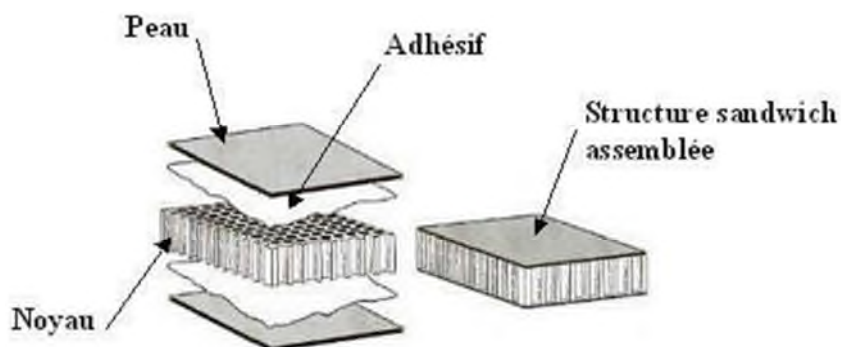


Figure 1.5 Constitution d'un sandwich

d- Matériaux à propriétés graduées (FGM)

Sont des nouvelles classes des matériaux composites appelés aussi matériaux à gradient fonctionnel (MGF) qui ont attiré une attention considérable pour les chercheurs. [1] Un FGM typique avec un effet élevé de couplage flexion-extension, est un composite homogène fabriqué à partir des différentes phases des composants des matériaux (le plus souvent en céramique et métal). Un exemple de ce matériau est illustré dans la figure 1.6. En variant progressivement la fraction volumique des constituants de ces matériaux, leurs propriétés matérielles présentent un passage lisse et continu d'une surface à une autre, éliminant ainsi les problèmes d'interface et l'atténuation des concentrations des contraintes thermiques.

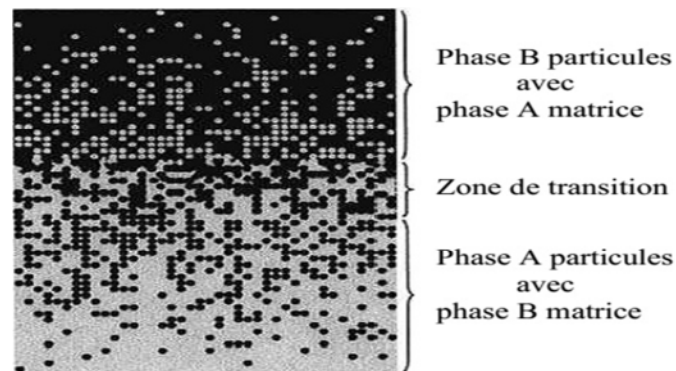


Figure 1.6. Matériaux à gradient fonctionnel

1.3. Techniques d'assemblage des matériaux stratifiés

Le collage est une technique d'assemblage courante qui consiste en l'adhésion par attraction moléculaire entre deux parties à coller et un adhésif interposé qui doit assurer la transmission des efforts. On peut citer pour principaux avantages de ce mode d'assemblage des couches d'un stratifié :

- La répartition des contraintes de liaison sur une surface importante
- La possibilité d'optimiser la géométrie et les dimensions du collage
- La légèreté de l'assemblage
- Les propriétés d'isolation et d'étanchéité de l'adhésif.

1.4 Domaines d'application des poutres composites

Les poutres composites entrent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines d'applications possibles : piscines, bassins, bâtiments, les transports aériens, maritime,

routier, ferroviaire, sports et loisirs...etc.

Dans beaucoup d'applications structurales comme sur les plates-formes pétrolières offshore. Les composites à matrice polymère apparaissent comme de sérieux concurrents des métaux, du fait principalement de leur légèreté. Pourtant, l'industrialisation de solutions composites est délicate, car les avantages compétitifs sont amoindris par les surcoûts induits, et surtout, par les difficultés à prévoir l'évolution des propriétés d'usage de ce type de matériaux, notamment sous sollicitations environnementales et mécaniques couplées. [2]

1.4.1. Composites dans l'industrie automobile

Les matériaux organiques composites à matrices thermoplastiques ou thermodurcissables renforcées par des fibres, généralement de verre, courtes ou longues, ont fait leur apparition dans l'automobile durant les années 60. Même s'ils sont aujourd'hui utilisés presque exclusivement pour satisfaire certaines fonctions, leur taux d'utilisation ne dépasse pas 10 à 15 % selon les véhicules. Généralement, l'habitacle (habillage intérieur) d'un véhicule est essentiellement constitué de matériaux polymères et de composites, qui à eux seuls représentent environ 50 % de la quantité utilisée sur un véhicule tant en Europe qu'aux États-Unis :

- 48 % pour les véhicules nord-américains en 1994
- 50 à 60 % (y compris les insonorisant) pour l'ensemble de la gamme actuelle

Renault. Les principales applications concernent : la planche de bord et le poste de conduite, les ébénisteries et les habillages des portes, les garnitures de toit, les sièges, la tablette arrière, les tapis de sol et les textiles.

Les principales applications concernent aussi les accessoires tels que: les peaux de boucliers, les calandres, les grilles d'auvent, les enjoliveurs de roues, les rétroviseurs, les feux de signalisation, les bras d'essuie-vitre, les baguettes, les becquets, les ailerons, les poignées de porte, etc. [3]

1.4.2. Composites dans l'aérospatiale

Les constructeurs aéronautiques font de plus en plus appel aux matériaux composites du type matrice polymère/fibres de carbone continues pour réduire la masse des aéronefs. La pénétration de ces matériaux est passée de 20 % pour l'Airbus A340 à plus de 50 % pour le futur Boeing B787. La réduction des coûts de fabrication à qualité mécanique constante passe par une intégration forte des phases de conception et de fabrication : sélection concomitante des constituants, semi-produits et modes d'assemblage. La prévision des performances doit être souple pour une gamme des solutions données. Un

essai représentatif du mode de sollicitation considéré comme le plus pénalisant permet une approche quantitative réaliste dans un contexte industriel. L'essai peut lui-même être en phase de développement lorsqu'il s'agit d'un système original. [4] Les poutres composites à base de fibres occupent une place de plus en plus importante dans la construction des avions, des hélicoptères, des missiles, des lanceurs et des satellites. Les composites renforcés par des fibres de carbone (CFRP), ont la masse composée à 60 % de fibres et à 40 % de résine. Mais il existe également des structures sandwichs et alvéolaires, les stratifiés fibres-métal, les composites à fibres de verre, sans oublier les fibres céramiques destinés notamment aux environnements à des températures très élevées tels que les moteurs des fusées. Le GLARE composé principalement d'aluminium et de fibre de verre est utilisé en aéronautique. Les composites ont fait leur apparition chez Airbus en 1972 lorsque le constructeur a décidé de les utiliser pour les bords d'attaque de la dérive de l'A300B. Les premières structures primaires, notamment de la dérive de l'A310-300 et de l'empennage horizontal et des volets de l'A320 suivent en 1987. Puis, c'est le tour de la gamme long-courrier avec l'empennage horizontal et vertical qui servent également de réservoirs de carburant, les gouvernes de profondeur et de direction, les volets, les ailerons, les déporteurs, les trappes d'atterrisseur ainsi que divers éléments de carénage de l'A340. La série des innovations révolutionnaires continue ensuite, par exemple avec le développement d'un support de quille en CFRP pour l'A340-500/-600, et surtout avec le bouclier de pressurisation pour ce même modèle, première pièce composite destinée à la partie pressurisée d'un fuselage. [5]

1.4.3. Les composites dans la construction navale

D'après la littérature, la première apparition des matériaux composites en construction navale se situerait en 1946. L'US-NAVY réalise à cette époque des embarcations de (28) pieds, destinées au transport du personnel, suivant deux techniques : - le moulage sous pression et l'injection sous vide avec des taux de fibres modestes (de l'ordre de 25 %). Progressivement la technique de stratification au contact de la voie humide s'impose pour les applications navales [6]. A partir de 1955, l'apparition des tissés de roving ainsi que des nouvelles techniques de moulage entraîne une croissance rapide des applications des matériaux composites, toujours limitées à des petites unités (jusqu'à 57 pieds) : vedettes des patrouilles côtières, transports de personnels, navires de débarquement.... Afin de remplacer le bois, putrescible, par des matériaux insensibles à la corrosion marine

et à l'eau de mer, tout en assurant une excellente flottabilité, en permettant de réaliser des volumes creux importants et solides à bas prix. Pour les bateaux de taille moyenne, (bateaux de plaisance, de pêche, grands catamarans de compétition et aussi les petits navires commerciaux ou les chasseurs de mines qui ne doivent pas avoir des coques métalliques), on construit donc des coques volumineuses en stratifiés polyester-verre, sur lesquelles on assemble les membrures, poutres et les renforts longitudinaux et couples, qui sont aussi réalisés en matériaux composites et qui peuvent être collés ou assemblés par stratification. [7]

CHAPITRE 2

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE RENFORCEMENT PAR MATÉRIAUX COMPOSITE EN FIBRE FRP

CHAPITRE 2 : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE RENFORCEMENT PAR LES MATERIAUX COMPOSITE EN FIBRE FRP

2.1. Généralités sur la démarche de diagnostic et de réparation

Toute réparation d'une structure endommagée doit être précédée par un diagnostic de la structure et des défaillances rencontrées. Dans ce cadre, un certain nombre de données doivent être regroupées :

- Le type structure et son fonctionnement
- la date de construction et de réparation ou renforcement réalisés s'il y a lieu
- La géométrie de structure
- Les caractéristiques des matériaux employés :
 - limite élastique
 - charge de rupture
 - allongement caractéristique de la ductilité
 - soudabilité
- Les défauts existants observés lors de l'inspection détaillée :
 - fissurations (localisation, dimensions...)
 - corrosion : type de corrosion, appréciation des sections résiduelle
 - déformations
 - défauts d'assemblage: fissuration de soudure, déconsolidation d'assemblage riveté ou boulonné
- Les auscultations réalisées, s'il y a lieu, destinées à la compréhension des désordres et/ou du fonctionnement de la structure
- Le recalcul de la structure s'il est réalisé

Ces éléments doivent permettre la compréhension des désordres, de leur apparition et le fonctionnement de la structure. L'analyse de ces éléments permet de conclure sur la ou les pathologies qui affectent l'ouvrage. Par exemple :

- Enroulement: défaut d'entretien de la protection anticorrosion
- Corrosion avec réduction de section résistante : matériau sensible, exposition,

mauvaise disposition constructive

- Fissuration: fragilité, chocs, sollicitations, fatigue matériau, fatigue des assemblages soudés. [8]

- Assemblages rivetés et/ou boulonnés : déconsolidation, rupture d'éléments, défauts de conception, défauts d'exécution, modifications, excès de sollicitation

Le recalcul de l'ouvrage sera généralement réalisé avec les moyens actuels, mais il sera nécessaire de remettre en cause les hypothèses simplificatrices de l'époque de construction et intégrer les constats faits lors de l'inspection détaillée (ex : réduction de section suite à la corrosion...). Selon les cas, il sera nécessaire d'ajuster les charges et les surcharges prises en compte et d'utiliser des modèles élaborés tels que le calcul aux éléments finis pour apprécier les concentrations des contraintes qui peuvent être à l'origine de la formation de fissures.[9]

Ainsi le projet de réparation pourra être élaboré en prenant en compte l'origine des désordres observés. Le projet devra également examiner la phase des travaux et les répercussions sur la structure, par exemples :

- Le remplacement d'un élément génère un report de charge sur le reste de la structure qu'il sera nécessaire de compenser provisoirement. De plus, l'élément remplacé, sauf disposition particulière, ne contribue pas à la reprise du poids propre de l'ouvrage.

- Le renforcement d'une section apporte une rigidité accrue et par suite, une modification de la répartition des efforts.

2.2. Méthodes et techniques de réparation et de renforcement des structures

L'ensemble des techniques et des méthodes de construction sont utilisées en réparation, soit en atelier par la préparation d'éléments, soit sur site pour raccorder ces éléments à la structure en place.

Les aciers modernes sont élaborés dans un objectif d'assemblage par soudage. Ce souci n'existait pas pour les matériaux métalliques anciens dont l'assemblage était réalisé par boulonnage ou par rivetage. Depuis les années 1950, les sidérurgistes ont développé les concepts de soudabilité métallurgique afin de faire évoluer les méthodes d'assemblage.

Tout projet de réparation doit faire l'objet d'une étude qui débute par la connaissance du matériau métallique employé et de son comportement métallurgique afin d'apprécier le comportement au soudage, d'adapter les paramètres et, s'il y a lieu, d'exclure celui-ci au profit des techniques d'assemblage telles que le rivetage ou le boulonnage. Compte tenu du mode de fonctionnement différent de ces techniques d'assemblage, il n'est pas possible de les utiliser partiellement sur un même assemblage.

2.2.1. Remplacement des éléments endommagés

De très nombreuses structures sont constituées par des éléments triangulés intérieurement hyperstatiques et il est souvent possible de démonter une barre (diagonale, ou montant) sans mettre en cause la stabilité de l'ouvrage sous son poids propre. Si l'on se contente de démonter une barre et de la remplacer sans précautions particulières, il est évident que la barre neuve ne participera pas à la résistance de l'ouvrage sous l'effet des charges permanentes. Il convient donc de mettre en place un dispositif provisoire capable d'équilibrer les efforts existant dans la barre à remplacer. Dans le cas d'une barre tendue, ce dispositif peut être facilement réalisé à l'aide de barres de précontrainte, figure 2.1. [10]

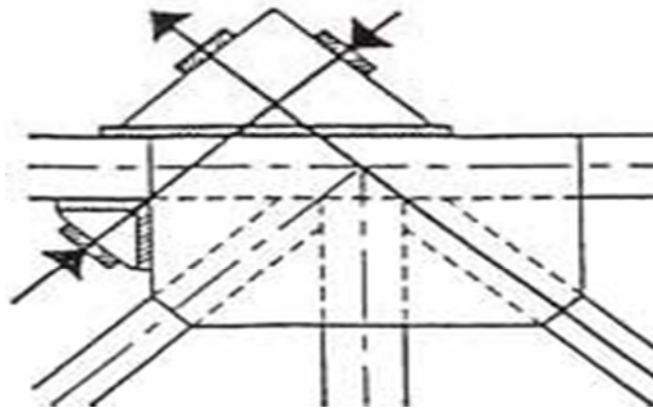


Figure 2.1 Principe d'ancrage de barre de précontrainte

2.2.2. Ajout de matière

Il est facile de renforcer une structure métallique en augmentant la section de ses éléments les plus faibles par ajout d'un profilé ou d'une tôle. Cette facilité ne doit pas faire oublier les précautions à prendre pour réaliser un tel renforcement.

A l'exception de certains cas particuliers où les efforts dus au poids propre sont nuls ou très faibles (ponts suspendus et viaduc métalliques démontables par exemple), il convient de soulager les efforts dans la structure lors du renforcement, de sorte que ce dernier participe au moins partiellement à la résistance sous le poids propre. Pour ce faire, trois méthodes sont couramment utilisées:

- installation de la structure sur appuis provisoires. Mais cette méthode, simple et efficace, n'est que rarement envisageable pour d'évidentes raisons de site
- mise en œuvre d'un précontraint provisoire. Lorsqu'il s'agit de renforcer une diagonale ou un montant, l'installation et l'ancrage de barres de précontrainte ne pose pas de problèmes majeurs dans les cas courants. Lorsqu'il s'agit de renforcer une membrure de poutre, l'ancrage des barres ou des câbles de précontrainte pose des problèmes technologiques (difficulté pour ancrer un effort concentré en partie courante d'une membrure, problèmes d'encombrement aux abouts de structure) ;
- recours aux dénivellations d'appuis : cette méthode, facile à mettre en œuvre dans de nombreux cas, voit son domaine d'application limité par la résistance des sections sollicitées par les transferts d'efforts.

L'augmentation des sections des membrures modifie la rigidité et la loi d'inertie de la structure, ce qui provoque une modification de la courbe des moments fléchissant et il convient d'en tenir compte dans le calcul. Il ne faut pas oublier de vérifier et éventuellement de renforcer les goussets d'attache. Il est inutile de prévoir des renforts en acier à haute limite élastique, les contraintes à ne pas dépasser en service normal étant limitées par la qualité des aciers en place. [10]

2.3. Réparation par soudage

2.3.1. Introduction

La soudure est en théorie le moyen le plus souple et le plus efficace pour réparer ou renforcer une structure. Son utilisation pose cependant des problèmes parfois difficiles à résoudre, en effet il est rare de trouver un acier ancien dont la soudabilité soit

équivalente à celle des aciers modernes, de plus les soudures étant réalisées in situ et en position, l'utilisation de certaines techniques de soudage est exclue. Le soudage relève de la métallurgie. La soudabilité des aciers (des fers puddlés de la fin du XIX^{ème} (19) siècle aux aciers modernes) a évolué considérablement. Depuis 1950, les sidérurgistes ont basé le développement des aciers en privilégiant leur soudabilité. Avant toute opération, il faut connaître le matériau, sa composition chimique, son élaboration et la façon dont il interagit dans la structure (les efforts qu'il transmet, son niveau de bridage, de sollicitation en fatigue) pour le souder de façon efficace. Cette connaissance est d'autant plus cruciale que les assemblages seront fortement sollicités.

2.3.2. Définitions

Le soudage est l'opération d'assemblage qui assure la continuité métallique de deux pièces par phénomène de fusion locale, (figure 2.2). [8]



Figure 2.2 : Soudage à l'arc avec fil fourré

Les aciers modernes se caractérisent par leur soudabilité : aptitude à être soudé, d'où la nécessité dans le cadre d'une réparation d'ouvrage ancien de s'assurer de la soudabilité des matériaux en présence.

La recommandation R 581/1967 de l'ISO définit ainsi la soudabilité: « On considère qu'un matériau métallique est soudable à un degré donné par un procédé et pour un type d'application donné, lorsqu'il se prête, moyennant les précautions correspondant à ce degré, à la réalisation d'une construction entre les éléments de laquelle il est possible d'assurer la continuité métallique par la constitution de joints soudés qui, par leurs caractéristiques locales et les conséquences globales de leur présence satisfont aux propriétés requises et choisies comme base de jugement».

Ces phénomènes génèrent des contraintes résiduelles internes à proximité des cordons qui peuvent entraîner des initiations de fissuration.

Dans le cas de réparation structure anciens et en présence d'acier à soudabilité non contrôlée, il convient de choisir des dessins d'assemblage simples conduisant à des bridages maîtrisés.

2.3. Réparation par boulonnage

2.3.1. Généralités

La construction des ponts à poutres en treillis au XIX^{ème} siècle et début du XX^{ème}, avant le développement de la soudure, a fait appel au mode d'assemblage par rivetage et par boulonnage ordinaire. En France, il subsiste peu structure présentant ce type d'assemblage par boulons ordinaires, en revanche de nombreuses applications sont encore en exploitation dans les pays constituant les anciennes colonies des pays européens. Ainsi, on rencontre de nombreuses structures de type « Pont Pigeaud », par exemple, constitués d'éléments de 2.5 m montés à l'avancement et assemblés par boulons ordinaires. Dans le cas des grandes structures, le boulonnage convient mal à l'assemblage des pièces épaisses et fortement sollicitées : il nécessite un nombre élevé de boulons et n'assure qu'un placage imparfait. Les assemblages boulonnés, quand ils sont utilisés, servent donc surtout à assembler sur chantier les entretoises ou les pièces de pont aux poutres principales. Le boulonnage est aussi utilisé pour assembler aux tabliers des éléments secondaires (rails de passerelles de visite) et des éléments provisoires (avant-becs de lançage, entretoisements de montage). Pour certaines petites structures, le boulonnage peut permettra d'éviter tout assemblage soudé, figure 2.3. [11]

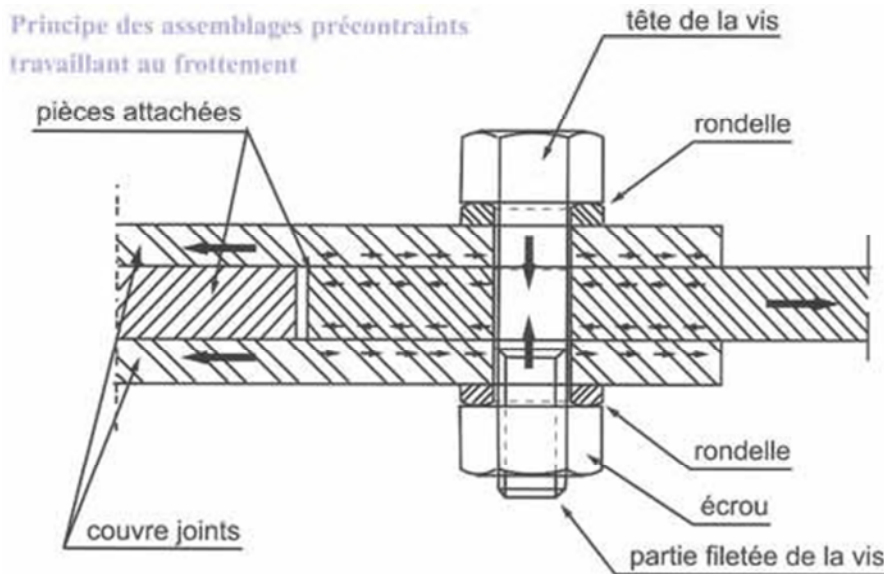


Figure 2.3 : Principe des assemblages précontraints.

Dans le cadre de réparation des structures in situ, la technique du boulonnage est utilisée sur structure anciens en remplacement du rivet ou en cas des difficultés de soudage métallurgique ou opératoire.

2.3.2. Catégories d'assemblages boulonnés

Les assemblages boulonnés se caractérisent, [11]:

- Par le mode de sollicitation
 - efforts perpendiculaires à l'axe des boulons
 - efforts parallèles à l'axe des boulons
- Par le mode de fonctionnement
 - non précontraint
 - précontraint

Catégories des assemblages boulonnés suivant le mode de sollicitation

a. Assemblages sollicités par des efforts perpendiculaires à l'axe des boulons

C'est le cas des assemblages de continuité des poutres. Les efforts sollicitant les éléments assemblés peuvent être principalement des efforts normaux (assemblage des membrures) ou des efforts de cisaillement (assemblages des âmes). La continuité des pièces est assurée par des couvre-joints (figure 2.4).

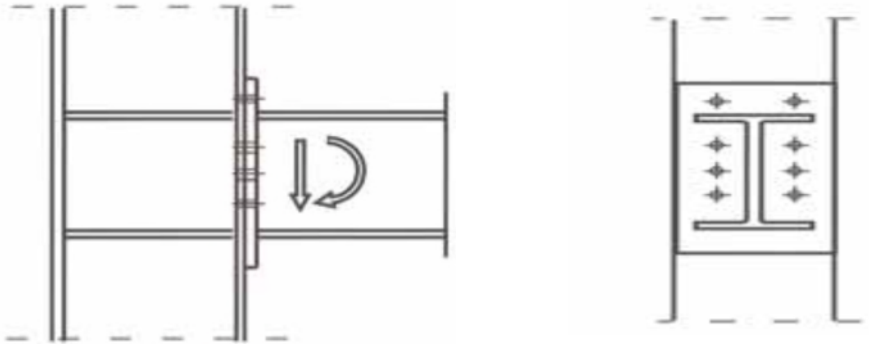


Figure 2.4 : Assemblages boulonnés sollicités perpendiculairement à l'axe des boulons

b. Assemblages sollicités par des efforts parallèles à l'axe des boulons

C'est le cas des assemblages poutre-poteau de bâtiment avec platine d'about. Généralement, il s'exerce à la fois un moment fléchissant et un effort tranchant et on a une combinaison d'efforts parallèles et d'efforts perpendiculaires à l'axe des boulons (figure 2.5).

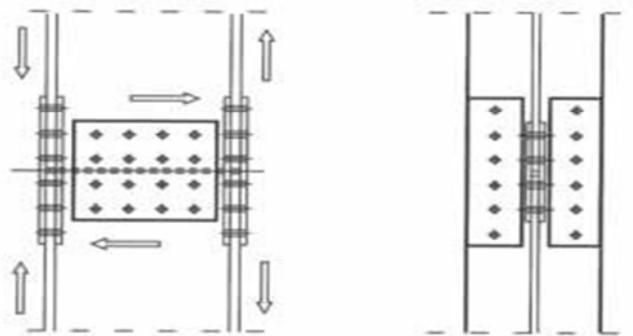


Figure 2.5 : Assemblage boulonné sollicité parallèlement à l'axe des boulons.

2.4. Réparation par rivetage

2.4.1. Généralités

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 seconde tête pour solidariser les éléments à assembler. Cette opération est désignée sous le terme de rivetage, (figure 2.6).

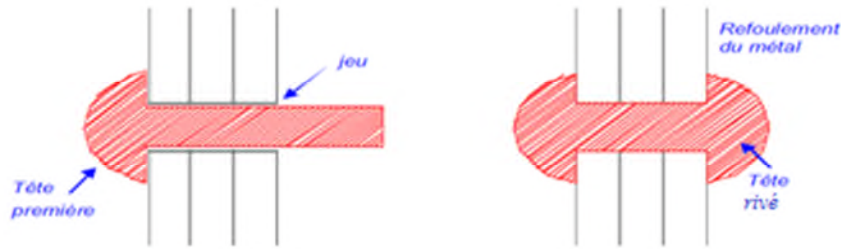


Figure 2.6 : Constitution d'un assemblage par rivetage

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.

2.5. Technique de réparation par collage des tissus composites sur la surface extérieure

Parmi les techniques de la réparation et du renforcement des structures endommagées est le collage des plaques métalliques sur la surface extérieure selon le procédé l'Hermitte. Le procédé L'Hermitte [(L'Hermitte 1967)] était l'un des plus répandus dans le monde en raison des avantages (Theillout 1990) :

- Il n'exige que des interventions mineures sur structure
- il est d'un emploi souple
- Les renforts sont peu gênants

Toutefois, selon [(Theillout 1997)], lors de l'utilisation des tôles collées sur la surface extérieure de la structure, les principaux problèmes d'ordre technologique sont :

- Mise en flexion locale des tôles au voisinage des fissures recouvertes
- Répartition des efforts entre les tôles dans le cas d'un empilement
- Répartition des déformations entre les aciers passifs internes à la structure et les aciers collés extérieurement.

En outre, le collage de tôles métalliques présente aussi quelques difficultés :

- Sensibilité de l'acier à l'oxydation (il demande donc une protection et un entretien soigné)
- Impossibilité de mobilisation de toute la résistance à la traction des tôles, même sous faible épaisseur (solicitation le long d'une face)
- Nécessité d'une préparation spécifique de la surface à traiter (la raideur des

tôles nécessite une surface parfaitement plane pour assurer l'uniformité de l'épaisseur du matériau de scellement) ;

- Nécessité d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine de collage ;
- Impossibilité de généraliser cette technique à des surfaces importantes (masses manipulées trop importantes), celle qui limite d'autant les possibilités de réparation
- De plus, le poids propre des plaques et leur rigidité spécifiques rendent difficiles les conditions d'application in situ.

Pour améliorer la technique du collage des plaques en acier et éviter une partie de ces problèmes évoqués ci-avant, en France, Freyssinet international a amélioré le procédé, en 1977, en perforant les tôles collées. La figure 2.7 présente le renforcement du « viaduc de Terrenoire » près de Saint-Etienne par des tôles collées perforées. [12]

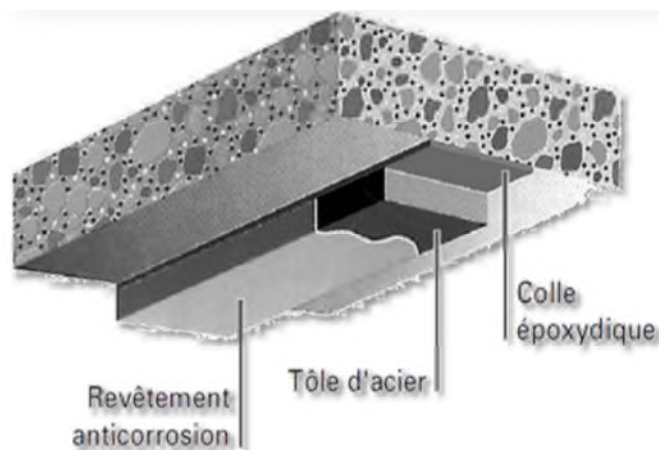
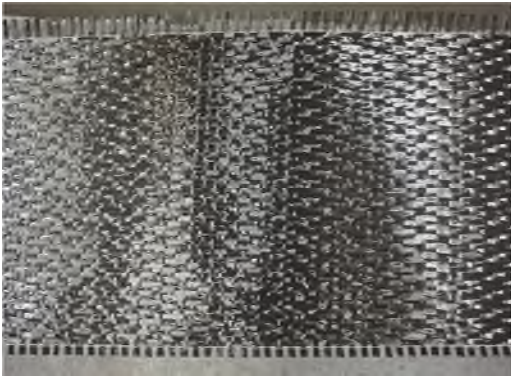
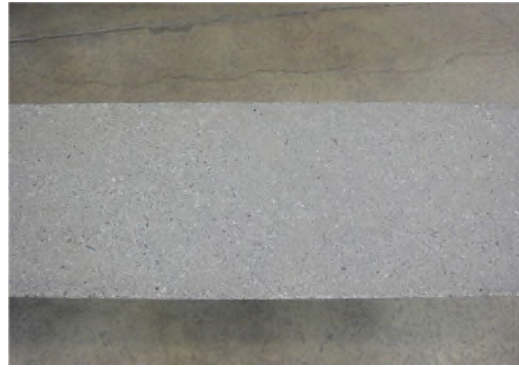


Figure 2.7: Réparation par collage de tôles en acier



Tissu composite en fibre de carbone



Préparation de la surface du collage



Première couche de la résine appliquée sur la surface tendue de la poutre



Mise en place manuellement le tissu composite



Presser manuellement



Le tissu composite sur place



Presser avec une spatule.



Deuxième couche de la résine sur le tissu composite (1 à 2 mm)

Figure 2.8 : Processus de réparation d'une poutre par le collage du tissu composite en fibre de carbone.

2.6. Technique de réparation par l'insertion des barres composites avec la technique NSM

Plus récemment, une nouvelle technique de renforcement avec les matériaux composites nommée armatures collées près de la surface ou Near Surface Mounted reinforcement (NSM) a attiré un nombre croissant des recherches ainsi que d'applications pratiques. Celle qui est ici appelée "NSM Reinforcement" a déjà été appelée sous autres noms tels que « Grouted Reinforcement » (Asplund 1949), ou "Embedded Reinforcement" (Warren 1998; Warren 2000). Des exemples de l'utilisation des barres en acier avec la technique NSM en Europe pour renforcer des structures remontent au début des années 1950 (Asplund 1949).

Le système NSM a aussi un certain nombre d'avantage par rapport au système de renforcement par collage sur la surface extérieure :

1. Le temps d'installation au site peut être réduite, comme la préparation des surfaces autres que le rainurage qui n'est plus nécessaire (par exemple, l'enlèvement du plâtre n'est pas nécessaire ; les irrégularités de la surface du béton peuvent être plus facilement négligées, l'enlèvement de la couche de laitance faible sur la surface du béton n'est plus nécessaire) ;
2. Le renforcement avec la technique NSM est moins enclin à la rupture par le décollement du béton ;
3. Les barres insérées avec la technique NSM peuvent plus facilement à ancré dans des éléments adjacents pour éviter le mode de ruine par décollement ; cette fonctionnalité est particulièrement intéressante dans le renforcement en flexion des poutres et des poteaux dans les charpente à joints rigides, où les moments maximaux se produisent généralement à l'extrémité des membres ;
4. Le renforcement avec la technique NSM peut être plus facilement précontraint ;
5. Les barres insérées avec la technique NSM sont protégées par le béton d'enrobage et sont donc moins exposées à des chocs accidentels et des dommages mécaniques, des cycles de gel-dégel, des températures élevées, de feu, des rayons ultraviolets et de vandalisme ; cet aspect qui rend cette technologie particulièrement adaptée au renforcement des poutres et/ou des dalles dans la zone de moment négatif ;
6. L'esthétique de la structure renforcée avec la technique NSM est pratiquement inchangée ;
7. Les résultats expérimentaux ont montré également une ductilité améliorée, et

une charge ultime qui se développe de façon plus indépendante de la résistance béton à la traction.

8. La technique NSM offre une plus grande résistance contre le décollement « peeling-off » ;
9. La technique NSM est aussi d'une qualité cohérente parce qu'il est pré durci et pultrudé.

2.7. Applications des barres composites insérées avec la technique NSM

Bien que la technique NSM en utilisant des barres composites (FRP) soit une technique relativement nouvelle, la première utilisation pratique de cette technique en utilisant des barres en acier a été signalée par Asplund (1949). La première application de la technique NSM par des fibres composites (FRP) a été signalée en 1998 et consistait à renforcer le pilier 12 de la Station Naval San Diego, CA (USA), (Warren 1998), (De Lorenzis 2002), où des barres en fibre de carbone insérées avec la technique NSM ont été utilisées pour augmenter la capacité de la dalle dans les zones sensibles, (figure 2.9). [12]



Dispositif à engravure



Insertion des jons de carbone
par la technique NSM

Figure 2.9 : Applications de la technique NSM avec des barres composites (FRP)

CHAPITRE 3
ANALYSE DES CONTRAINTES
D'INTERFACE SOUS CHARGEMENT
MÉCANIQUE

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES CONTRAINTES D'INTERFACES SOUS CHARGEMENT MÉCANIQUE

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons choisi de détailler le modèle analytique des travaux qui sont fait par [13], en illustrant les différentes étapes de son l'élaboration. En effet ce modèle servira de base pour mon travail dans la mesure où il repose sur des hypothèses simples que nous tenterons d'enrichir. Un analyse par élément finis a été mis en point dans le but de valider les résultats analytique, une bonne concordance a été obtenus avec les travaux fait par [14].

Les hypothèses suivantes seront present dans cette section :

- 1) Les matériaux sont considérés homogènes et élastiques.
- 2) Les déformations de la poutre et la plaque de renforcement sont dues au moment de flexion et aux efforts tranchants et de cisaillement.
- 3) Les contraintes normales et tangentielles sont supposées être constantes suivant l'épaisseur de l'adhésif.
- 4) Les courbures des deux adhérents, poutre et plaque de renforcement, sont supposés être identiques.
- 5) Les termes de cisaillement le long des épaisseurs des adhérents sont négligés.

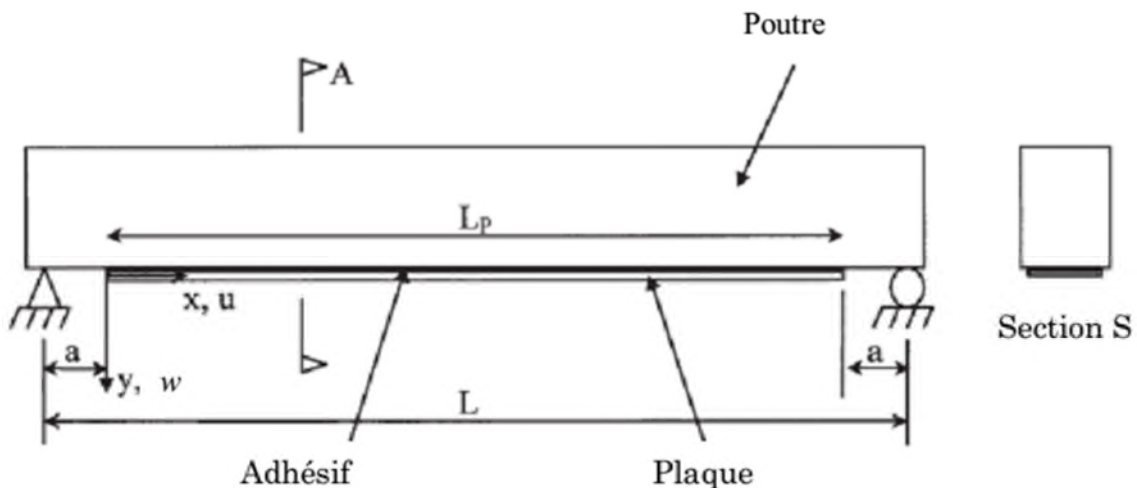


Figure 3.1 Structure rectangulaire renforcée par une plaque composite

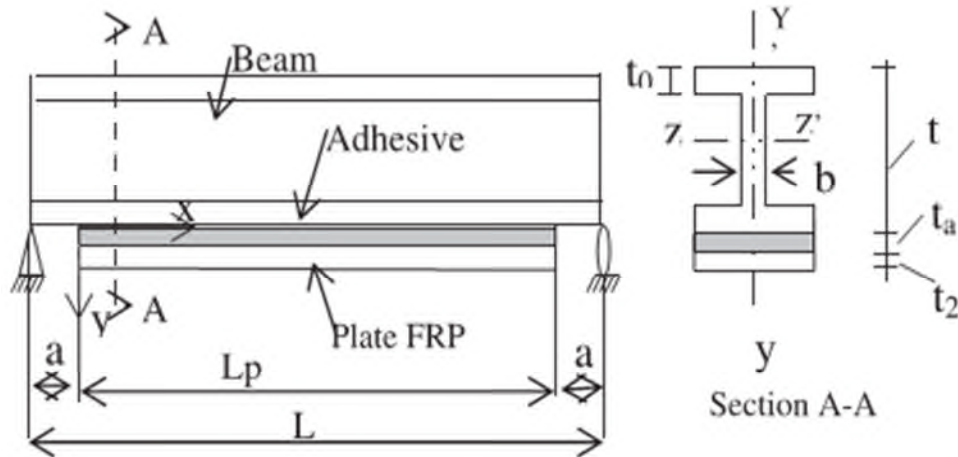


Figure 3.2 Géométrie de la structure en I

A partir d'un élément infinitésimal, il est possible de définir toutes les forces agissantes sur cet élément (figure 3.3) [15].

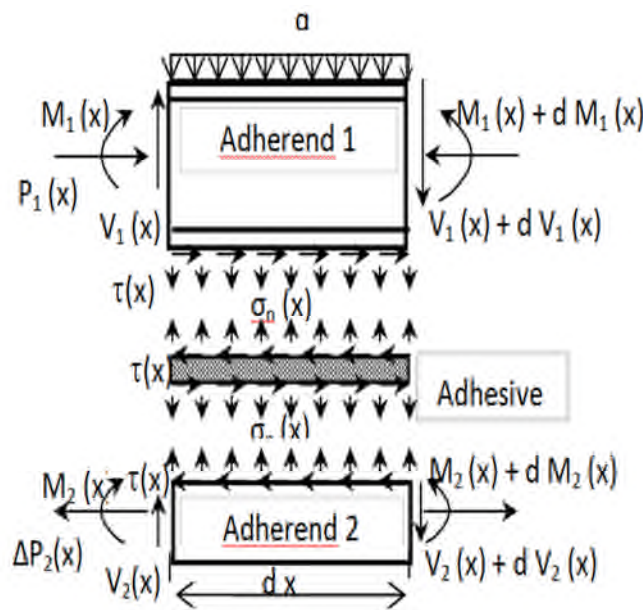


Figure 3.3 Efforts agissant sur un élément infinitésimal de la poutre renforcée.

Dans la figure (3.3), l'adhérent 1 désigne la poutre et l'adhérent 2 désigne la plaque de renforcement. Dans ce qui suit, les indices 1 et 2 sont relatifs respectivement à la poutre et la plaque de renforcement.

3.2. Equations différentielles des contraintes tangentielles d'interface

A partir de la relation linéaire qui relie les contraintes aux déformations, il est possible d'écrire les contraintes d'interface de cisaillement (τ) comme suit.

Par définition la déformation de cisaillement γ est donnée par :

$$\gamma_a = \frac{du(x, y)}{dy} + \frac{dv(x, y)}{dx} \quad (3.1)$$

Où u et w sont respectivement les déplacements horizontal et vertical de n'importe quel point de l'adhésif.

$$\tau(x) = G_a \left[\frac{\partial u(x, y)}{\partial y} + \frac{\partial v(x, y)}{\partial x} \right] \quad (3.2)$$

G_a est le module de cisaillement l'adhésif.

En dérivant l'équation (3.2) par rapport à x nous obtenons :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = G_a \left[\frac{d^2 u(x)}{dy dx} - \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \right] \quad (3.3)$$

La courbure peut être exprimée en fonction du moment de flexion comme suit :

$$\frac{d^2 w(x, y)}{dx^2} = -\frac{1}{(EI)_T} M_T(x) \quad (3.4)$$

$(EI)_T$ est la rigidité de flexion de l'ensemble poutre-plaque et $M_T(x)$ est le moment total.

On suppose une variation linéaire du déplacement horizontal suivant l'épaisseur de l'adhésif [13].

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{t_a} [u_2(x) - u_1(x)] \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial x \partial y} = \frac{1}{t_a} \left[\frac{du_2(x)}{dx} - \frac{du_1(x)}{dx} \right] \quad (3.6)$$

Où $u_1(x)$ et $u_2(x)$ sont respectivement le déplacement horizontal à la base de la poutre et à la face supérieure de la plaque de renforcement. t_a est l'épaisseur de l'adhésif [16]. En introduisant les équations (3.4) et (3.6) dans l'équation (3.3) nous obtenons :

$$\tau(x) = \frac{G_a}{t_a} \left[\frac{du_2(x)}{dx} - \frac{du_1(x)}{dx} - \frac{t_a}{(EI)_T} M_T(x) \right] \quad (3.7)$$

En raison de la grande inertie de la poutre, le troisième terme de l'équation (3.7) lié à $(EI)_T$ peut être négligé et ne sera plus pris en compte dans ce qui va suivre.

En tenant compte des trois composantes de déformation : axiale, et de flexion, la déformation à la base de l'adhérent 1 et la déformation en haut de l'adhérent 2 s'écrivent comme suit :

$$\varepsilon_1 = \frac{du_1}{dx} = \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1(x)}{E_1 A_1} \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{du_2}{dx} = -\frac{y_2}{E_2 I_2} M_2(x) + \frac{N_2(x)}{E_2 A_2} \quad (3.9)$$

$N(x)$ et $M(x)$ sont respectivement l'effort normal et le moment de flexion dans chaque adhérent.

y_1 et y_2 sont les distances séparant les axes neutres de chaque adhérent de leur interface respective avec l'adhésif.

A_1 , A_2 , I_1 , et I_2 sont respectivement les sections transversales et les moments d'inertie de chaque adhérent.

E_1 , E_2 , G_1 , et G_2 sont respectivement les modules élastiques et de cisaillement de chaque adhérent et α est un coefficient qui tient compte de la répartition des contraintes de cisaillement à travers les sections des adhérents.

L'équilibre horizontal donne :

$$\frac{dN_1(x)}{dx} = \frac{dN_2}{dx} = b_2 \tau(x) \quad (3.10)$$

$$N_1(x) = N_2(x) = N(x) = b_2 \int_0^x \tau(x) dx \quad (3.11)$$

On suppose que les courbures des adhérents sont identiques [13], il en résulte que :

$$\frac{d^2 w_1(x, y)}{dx^2} = \frac{d^2 w_2(x, y)}{dx^2} = -\frac{1}{E_1 I_1} M_1(x) = -\frac{1}{E_2 I_2} M_2(x) \quad (3.12)$$

D'où :

$$M_1(x) = R M_2(x) \quad \text{avec} \quad R = \frac{E_1 I_1}{E_2 I_2} \quad (3.13)$$

L'équilibre des moments de l'élément infinitésimal de la figure 3.1 donne :

$$M_T(x) = M_1(x) + M_2(x) + N_2(y_1 + y_2 + t_a) \quad (3.14)$$

A partir des équations (3.11), (3.13) et (3.14) nous obtenons les expressions des moments dans chaque adhérent en fonction du moment total $M_T(x)$:

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = V_1(x) = \frac{R}{R+1} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (3.15)$$

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = V_2(x) = \frac{R}{R+1} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (3.16)$$

En injectant les équations (3.8) et (3.9) dans l'équation (3.7) et en dérivant celle-ci une fois nous obtenons l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} = \frac{G_a}{t_a} \left(\frac{1}{E_2 A_2} \frac{dN_2(x)}{dx} - \frac{y_2}{E_2 I_2} \frac{dM_2(x)}{dx} - \frac{y_1}{E_1 I_1} \frac{dM_1(x)}{dx} + \frac{1}{E_1 A_1} \frac{dN_1(x)}{dx} \right) \quad (3.17)$$

En substituant les équations des efforts tranchants (3.17) et (3.18) ainsi que l'équation de l'effort normal (3.11) dans l'équation (3.19) nous obtenons l'équation différentielle de la contrainte tangentielle :

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} - K_s b_2 \left(\frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right) \tau(x) + K_s \left(\frac{y_1 + y_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) V_T(x) = 0 \quad (3.18)$$

3.3. Equation différentielle des contraintes normales d'interface

Etant donné que sous chargement vertical, un arrachement se produit entre les deux adhérents, une contrainte normale se développe à l'interface [18]. Cette contrainte est donnée comme suit :

$$\sigma_n(x) = \frac{E_a}{t_a} \Delta w = \frac{E_a}{t_a} [w_2(x) - w_1(x)] \quad (3.19)$$

Où $w_1(x)$ et $w_2(x)$ sont respectivement le déplacement vertical à la base de la poutre et à la face supérieure de la plaque de renforcement et E_a est le module élastique de l'adhésif. L'équilibre des deux adhérents donne :

Adhérent 1 :

$$\frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} = -\frac{M_1(x)}{E_1 I_1} \quad (3.20)$$

Adhérent (2):

$$\frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} = -\frac{M_2(x)}{E_2 I_2} \quad (3.21)$$

L'équilibre, de la plaque FRP et de la poutre donne la relation entre le moment de flexion et leurs forces de cisaillement mentionnées dans les équations (3.20) and (3.21).

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = V_1(x) - b_2 y_1 \tau(x), \quad \frac{dM_2(x)}{dx} = V_2(x) - b_2 y_2 \tau(x) \quad (3.22)$$

$$\frac{dV_1(x)}{dx} = -b_2 \sigma_n(x) - q, \quad \frac{dV_2(x)}{dx} = b_2 \sigma_n(x) \quad (3.23)$$

La substitution la dérivée d'équations (3.22) et (3.23) dans le quatrième dérivé de la contrainte normale obtenue par l'équation (3.24), donne:

$$\frac{d^4 \sigma_n(x)}{dx^4} + \frac{E_a b_2}{t_a} \left(\frac{1}{E_1 I_1} + \frac{1}{E_s I_s} \right) \sigma_n(x) + \frac{E_a b_2}{t_a} \left(\frac{y_1}{E_1 I_1} - \frac{y_2}{E_2 I_2} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q E_a}{t_a E_1 I_1} = 0 \quad (3.24)$$

3.4. Solutions générales

La solution générale de l'équation (3.21) est alors donnée par [6-7] :

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sinh(\lambda x) + m_1 V_T(x) \quad (3.25)$$

$$\lambda^2 = K_1 b_1 \left(\frac{(y_1 + y_s)(y_1 + y_s + t_a)}{E_1 I_1 + E_s I_s} + \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_s A_s} \right) \quad (3.26)$$

$$m_1 = \frac{K_1}{\lambda^2} \left(\frac{(y_1 + y_s)}{E_1 I_1 + E_s I_s} \right) \quad (3.27)$$

La solution générale de l'équation (3.24) est donnée par :

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] + e^{\beta x} [C_3 \cos(\beta x) + C_4 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (3.28)$$

Pour des grandes valeurs de x , il est supposé que la contrainte normale tend vers zéro, par conséquent $D3 = D4 = 0$. La solution générale (3.24) devient alors :

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (3.29)$$

$$\beta = 4 \sqrt{\frac{E_a b_1}{4t_a} \left(\frac{1}{E_1 I_1} + \frac{1}{E_s I_s} \right)} \quad (3.30)$$

$$n_1 = \left(\frac{y_1 E_s I_s - y_s E_1 I_1}{E_1 I_1 + E_s I_s} \right) n_2 = \frac{E_s I_s}{b_1 (E_1 I_1 + E_s I_s)} \quad (3.31)$$

Les constantes d'intégration C_1 et C_2 sont déterminées par les conditions aux limites [8].

$$\begin{cases} N_1(0) = N_2(0) = 0 \\ M_2(0) = 0 \\ \tau(L_p/2) = 0 \end{cases} \quad (3.32)$$

3.5. Simulations numériques

3.5.1. Modélisation utilisée

Les défis de la construction aujourd'hui demandent un gain de temps dans la conception et dans la réalisation des constructions. Ansys est un logiciel permettant d'optimiser le processus de conception. Il permet de proposer des solutions plus innovantes en intégrant notamment des pré-analyses dans le cycle de conception.

La méthode des éléments finis permet de calculer quantitativement le comportement d'un système composé de plusieurs éléments avec des interactions complexes, à condition que leurs interactions soient décrites par une équation aux dérivées partielles linéaires.

3.5.1. Choix des éléments

Les descriptions pour chaque type d'élément sont disposées dans la bibliothèque des éléments d'Ansys. Afin de réduire le temps de calcul de l'ordinateur, le temps de modélisation et le volume du fichier résultats, on analyse la moitié de la poutre modélisée en raison de la symétrie de la géométrie et des conditions de chargement. Un maillage raffiné est effectué près de l'extrémité de la plaque en FRP, figure 3.4 [22].

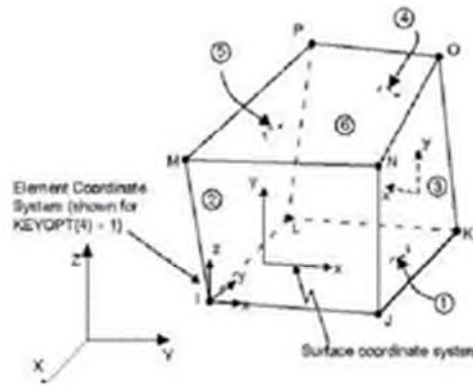


Figure 3.4. Élément Solide 45 (Ansys)

3.6. Résultats et interprétations

Dans cette section, deux types de poutres sont étudiées, la forme en I et la forme rectangulaire, renforcées dans leur face tendue par le collage d'une plaque en fibre de carbone (CFRP), voir figure 3.1. Les deux poutres sont simplement appuyées et soumises à une charge mécanique uniforme. Un récapitulatif des propriétés géométriques et matérielles est donnée dans les (tableaux 3.1 et 3.2).

Tableau 3.1. Paramètres géométriques et matériels (poutre rectangulaire)

Composant	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	E (GPa)	ν
Poutre	200	300	30	0.18
Adhésive	200	2	2	0.35
Plaque (FRP)	200	12	100	0.3

Tableau 3.2. Paramètres géométriques et matériels (poutre I)

Composant	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	E (GPa)	ν
Poutre en Acier	300	874	210	0.3
Adhésive	211.9	2	2	0.35
Plaque (FRP)	200	2	310	0.3

Dans le but de valider le modèle présent, nous optons pour une comparaison avec quelques modèles existant dans la littérature [13], pour les deux cas d'étude. Les figures (3.4) et (3.5) montrent l'évolution des contraintes d'interface le long des deux types de poutre renforcées par une plaque en fibres (FRP) sous chargement uniformément réparti. Ces figures montrent aussi la concordance des deux modèles avec l'analyse menée dans cette étude par élément finis [20].

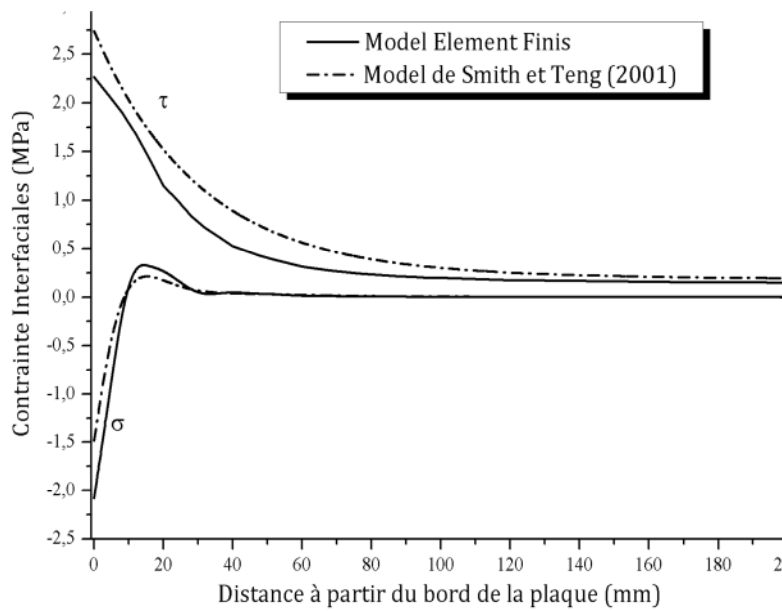


Figure. 3.4. Comparaison entre contraintes d'interfaces dans la poutre rectangulaire renforcée par plaque FRP

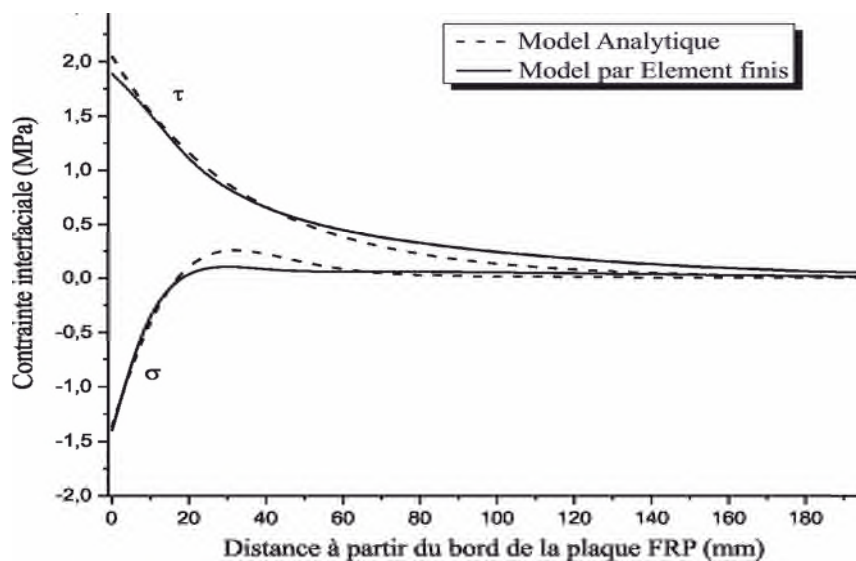


Figure 3.5. Comparaison entre contraintes d'interfaces la poutre métallique forme I renforcée par FRP

Ces figures 3.4 et 3.5 montrent clairement que le maximum des contraintes d'interface se situe au bord de la plaque de renforcement confirmant ainsi que le décollement se produit à cet endroit précis. Cependant ces valeurs des contraintes d'interface au bord de la plaque de renforcement sont déterminantes et jouent un rôle important dans le dimensionnement des assemblages collés.

3.7. Étude paramétrique

Une étude paramétrique, en prenant en considération la variation de l'épaisseur de la couche adhésive et de la plaque FRP [17], a été menée pour évaluer la sensibilité du comportement de l'interface aux paramètres géométriques qui ont un effet marqué sur l'amplitude de la valeur du pic de la contrainte de cisaillement et de la contrainte normale.

3.7.1. Effet de l'épaisseur du renfort FRP

On constate que l'épaisseur du renfort joue un rôle important pour la diminution de la valeur de la concentration des contraintes interfaciales. Les contraintes de cisaillement prennent des valeurs importantes en comparaison avec les contraintes de décollement. On remarque que plus la valeur de l'épaisseur augmente plus la valeur des contraintes diminue. Pour plus de détail sur les valeurs numériques voir la figure 3.6. La valeur de ces contraintes de cisaillement s'annule après la distance de 100mm du bord de la plaque. Ainsi, les contraintes de décollement diminuent proportionnel avec diminution de l'épaisseur de la plaque et leur valeur s'annule après la distance de 40mm.

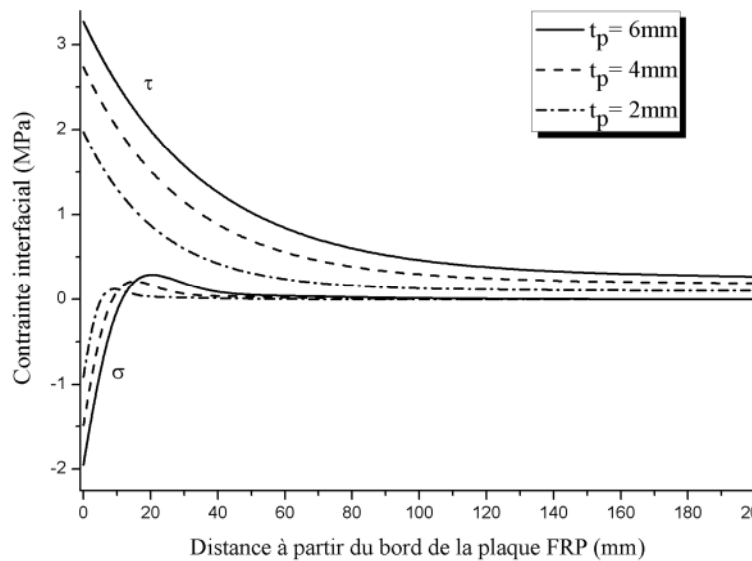


Figure 3.6. Effet de l'épaisseur de la plaque FRP sur des contraintes interfaciales dans une poutre renforcé par FRP.

3.7.2. Effet de l'épaisseur de l'adhésif

L'épaisseur de l'adhésif joue un rôle essentiel dans la réhabilitation des structures ayant perdu partiellement ou totalement leur résistance et leur rigidité.

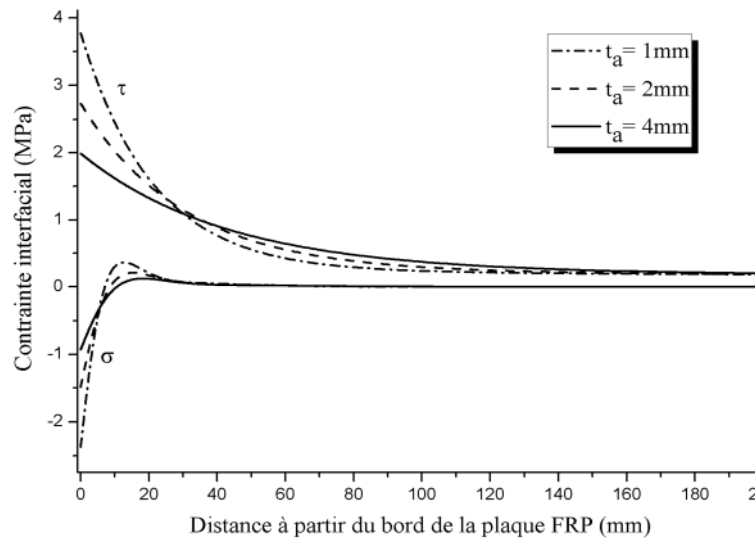


Figure 3.7. Effet de l'épaisseur de la couche adhésive sur des contraintes interfaciales dans une poutre renforcé par FRP.

La figure 3.7 montre que les contraintes de cisaillement interfaciales des poutres renforcées avec différentes épaisseurs de couche d'adhésif, dont 1, 2 et 4 mm. Les valeurs maximales de contraintes se produisent à l'extrémité du FRP. On peut voir que les contraintes interfaciales diminuent non linéairement avec l'augmentation de distance depuis l'extrémité du FRP. La contrainte de cisaillement tend vers zéro lorsque la distance de l'extrémité CFRP est supérieure à 100 mm. Entre la distance de 0-40 mm de l'extrémité du FRP, les contraintes interfaciales pour différent épaisseur de la colle varient fortement. On voit que la réduction de l'épaisseur de la couche adhésive conduit à une augmentation des contraintes interfaciales.

3.8. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté une approche pour résoudre les problèmes de l'effet de bord qui surviennent pendant le renforcement des structures et équipement endommagées. Une solution analytique sur la base [13] été présentée, pour la prédiction des contraintes interfaciales sous chargement mécaniques, cette approche analytique a été étendue par un analyse sous élément finis sous environnement Ansys. On déduit une bonne concordance entre les deux modèles établies, et on a abouti à un résultat intéressant concernant la comparaison des deux types de structures.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées sur la base des résultats numériques obtenus en utilisant la nouvelle approche et leur implication dans la conception pratique:

- Les résultats et l'analyse montrent l'existence d'une forte concentration de contrainte à l'extrémité de la structure renforcée.

- Les contraintes interfaciales sont influencées par l'épaisseur de la plaque FRP et de l'adhésive.

La méthode proposée est simple et précise. Les résultats obtenus constituent une amélioration dans la conception pratique pour fiabilité structurelle et l'augmentation de durée de vie des structures en I, avec un gain en résistance, en poids et en cout.

CHAPITRE 4

EFFET THERMIQUE SUR LES

STRUCTURES RENFORCÉES

PAR COMPOSITE EN FIBRE

CHAPITRE 4 : EFFET THERMIQUE SUR LES STRUCTURES RENFORCÉES PAR COMPOSITE EN FIBRE

4.1. Introduction

Actuellement, l'utilisation des plaques en composites pour le renforcement des structures métalliques, est une des méthodes récentes pour la réhabilitation des structures qui présentent un vieillissement ou des défauts de forme ou de chargement. Dans ce chapitre une analyse originale sur la modélisation numérique et analytique des contraintes d'interface entre la poutre et la plaque de renforcement en (FRP) a été finalisée. L'originalité, dans le modèle adopté et développé, met en évidence une théorie qui tient en compte l'effet thermique des adhérents.

4.2. Fondements théoriques

La figure 1 montre la forme géométrique de la structure renforcée avec ses paramètres dimensionnels, ainsi, que la section A-A pour représenter la configuration de l'interface du joint adhésif.

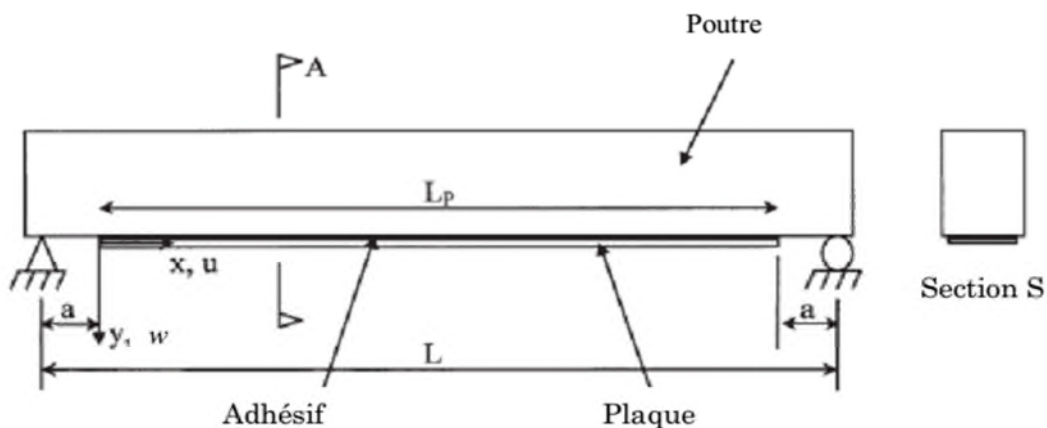


Figure 4.1. Poutre rectangulaire renforcée par une plaque composite

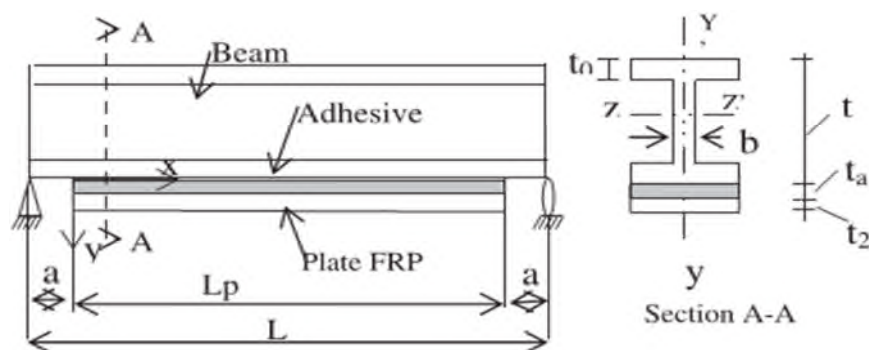


Figure 4.2. Géométrie de la structure en I

La figure 3.3 du chapitre 3, montre une section de la poutre et de la plaque en FRP, où les contraintes d'interfaces cisaillement et normales sont désignés par $\tau(x)$ et $\sigma(x)$, respectivement. La figure 4.2 montre également la convention de signe positif pour le moment de flexion, pour la force de cisaillement, pour la force axiale et pour la charge appliquée. La contrainte de cisaillement dans la couche d'adhésif à n'importe quelle section (x) est donnée par :

$$\tau(x) = G_a \left(\frac{du(x, y)}{dy} + \frac{dv(x, y)}{dx} \right) \quad (4.1)$$

Après différenciation de l'équation 4.1 on peut exprimer en termes de déformation mécanique de la poutre et de la plaque FRP $\varepsilon_1(x)$ et $\varepsilon_2(x)$ comme :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = \frac{G_a}{t_a} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \quad (4.2)$$

G_a , t_a , $u(x, y)$ et $v(x, y)$ dénote, respectivement, le module de cisaillement, l'épaisseur de l'adhésive, les déplacements dans le sens longitudinal et transversal en tout point de la couche d'adhésif.

Les déformations dans le joint adhésif des éléments renforcés sont données par les équations (4.3) et (4.4), [21-22]

$$\varepsilon_1 = \alpha_1 \Delta T + \frac{M_1 \frac{t_1}{2}}{E_2 I_2} + \frac{\sigma_1}{E_1} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_2 = \alpha_2 \Delta T - \frac{M_2 \frac{t_2}{2}}{E_2 I_2} + \frac{\sigma_2}{E_2} \quad (4.4)$$

L'équilibre horizontal de la structure donne

$$\sigma_1 A_1 = -\sigma_2 A_2 \quad (4.5)$$

$$N_1 = -N_2 \quad (4.6)$$

En substituant (4.6) dans (4.3) et (4.4) conduit à l'équation (4.7)

$$\varepsilon_1 = \alpha_1 \Delta T + \frac{M_1 \frac{t_1}{2}}{E_2 I_2} + \frac{N_1}{A_1 E_1} \quad (4.7)$$

Et

$$\varepsilon_2 = \alpha_2 \Delta T - \frac{M_2 \frac{t_2}{2}}{E_2 I_2} + \frac{N_2}{A_2 E_2} \quad (4.8)$$

α est le coefficient d'expansion thermique, ΔT la différence de température, E , I et A sont respectivement, le module de young, le moment d'inertie et la section. Les indices 1, 2 dénote la poutre et la plaque FRP, respectivement.

Substitution de (4.7) et (4.8) dans (4.2) donne :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = \frac{G_a}{t_a} \left((\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T - \frac{M_2 \frac{t_2}{2}}{E_2 I_2} - \frac{M_1 \frac{t_1}{2}}{E_1 I_1} + \frac{N_2}{A_2 E_2} - \frac{N_1}{A_1 E_1} \right) \quad (4.9)$$

À partir du moment d'équilibre du tronçon différentiel de la poutre renforcée, figure 4.2, on donne l'équation (4.10)

$$M_T(x) = M_1(x) + M_2(x) + M_a - N_1 \left(\frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2} + t_a \right) \quad (4.10)$$

Où $M_T(x)$ est le moment total appliqué et M_a est le moment appliqué à l'adhésif exprimée comme :

$$M_a = - \int_0^x \tau(t) t_a dt = t_a N_1 \quad (4.11)$$

Selon les conditions aux limites, $M_2=0$ et équation (4.10) donne :

$$M_1 = N_1 \left(\frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2} \right) + M_T(x) \quad (4.12)$$

En substituant la force longitudinale à partir de (4.6) et le moment de flexion à partir de (4.12) dans (4.9) donne :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = \frac{G_a}{t_a} \left((\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T - \frac{\left(N_2 \left(\frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2} \right) M_T(x) \right) \frac{t_1}{2}}{E_1 I_1} - N_1 \left(\frac{1}{A_2 E_2} + \frac{1}{A_1 E_1} \right) \right) \quad (4.13)$$

L'équilibre horizontal de la plaque FRP donne :

$$- \tau b = \frac{dN_2}{dx} \quad (4.14)$$

Différenciation de l'équation (4.13) par rapport à (x) et en substituant l'équation (4.14) qui

donne l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} = \lambda^2\tau - g\lambda^2 M'(x) \quad (4.15)$$

La solution générale de cette équation est donnée:

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sinh(\lambda x) + B + m_1 V_T(x) \quad (4.16)$$

Ou :

$$\lambda^2 = k_s b \left[\frac{\left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right)\left(\frac{t_1}{2}\right)}{E_1 I_1} + \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right] \quad (4.17)$$

$$B_1 = \frac{-\frac{1}{\lambda} \operatorname{sosh}\left(\lambda \frac{L_p}{2}\right) \left(\left(k_s (\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T + \frac{M_T(0) \frac{t_1}{2}}{E_1 I_1} + m_1 M_T''(0) \right) - m_1 V_T\left(\frac{L_p}{2}\right) \right)}{\cosh\left(\lambda \frac{L_p}{2}\right) + \sinh\left(\lambda \frac{L_p}{2}\right)} \quad (4.18)$$

$$B_2 = \frac{\frac{1}{\lambda} \operatorname{sosh}\left(\lambda \frac{L_p}{2}\right) \left(\left(k_s (\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T + \frac{M_T(0) \frac{t_1}{2}}{E_1 I_1} + \frac{M_T(0) \frac{t_1}{2}}{E_1 I_1} + m_1 M_T''(0) \right) - m_1 V_T\left(\frac{L_p}{2}\right) \right)}{\cosh\left(\lambda \frac{L_p}{2}\right) + \sinh\left(\lambda \frac{L_p}{2}\right)} \quad (4.19)$$

$$m_1 = \frac{k_s}{\lambda^2} \frac{t_1}{2E_1 I_1} \quad (4.20)$$

$$B = -k_s \frac{b}{A_2 \lambda^2} (\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T \quad (4.21)$$

B est le coefficient thermique et K_s , tel que $k_s = \frac{G_a}{t_a}$

B_1 et B_2 sont déterminées à partir des conditions aux limites [13], [21-22]

4.3. Distribution de la contrainte normale

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

$$\sigma_n(x) = \frac{E_n}{t_a} \Delta w = k_n [w_2(x) - w_1(x)] \quad (4.22)$$

K_n est la rigidité normale de l'adhésif par unité de longueur,

$w_2(x)$ et $w_1(x)$ sont les déplacements verticaux des adhérents (1) et (2), respectivement.

Différenciation de l'équation (22) deux fois donne

$$\frac{d^2 \sigma_n(x)}{dx^2} = k_n \left[\frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} - \frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} \right] \quad (4.23)$$

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

Adhérent (1)

$$\frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} = -\frac{M_1(x)}{E_1 I_1} \quad (4.24)$$

Adhérent (2)

$$\frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} = -\frac{M_2(x)}{E_2 I_2} \quad (4.25)$$

Substitution des équations (4.24) et (4.25) dans la quatrième dérivée de la contrainte normale obtenue à partir de l'équation (4.22) donne l'équation différentielle suivante .

$$\frac{d^4 \sigma_n(x)}{dx^4} + k_n b \left(\frac{1}{E_1 I_1} + \frac{1}{E_2 I_2} \right) \sigma_n(x) - k_n b \left(\frac{t_1}{2E_1 I_1} - \frac{t_2}{2E_2 I_2} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} - k_n \frac{q}{E_1 I_1} = 0 \quad (4.26)$$

La solution générale de cette équation différentielle du quatrième ordre est :

$$\sigma(x) = e^{-\beta x} [D_1 \cos(\beta x) + D_2 \sin(\beta x)] + e^{\beta x} [D_3 \cos(\beta x) + D_4 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (4.27)$$

Pour de grandes valeurs de x , on suppose que la contrainte normale tend vers zéro, et $D_3 = D_4 = 0$.

La solution générale devienne donc:

$$\sigma(x) = e^{-\beta x} [D_1 \cos(\beta x) + D_2 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (4.28)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E_a b}{4t_a} \left(\frac{1}{E_2 I_2} + \frac{1}{E_1 I_1} \right)} \quad (4.29)$$

$$n_1 = \frac{t_1 E_2 I_2 - t_2 E_1 I_1}{2(E_1 I_1 + E_2 I_2)} \quad (4.30)$$

$$n_2 = \frac{E_2 I_2}{b(E_1 I_1 + E_2 I_2)} \quad (4.31)$$

$$n_3 = k_n b \left(\frac{\frac{t_1}{2}}{E_1 I_1} - \frac{\frac{t_2}{2}}{E_2 I_2} \right) \quad (4.32)$$

D_1 et D_2 sont des coefficients constants déterminés à partir des conditions aux limites

$$\begin{cases} N_1(0) = N_2(0) = 0 \\ M_2(0) = 0 \\ \tau(L_p/2) = 0 \end{cases} \quad (4.33)$$

4.4. Résultats et discussions

L'analyse par éléments finis a été utilisée dans le but de valider les résultats de la procédure analytique décrite en dessus. L'élément quadratique solide 45 a été utilisé dans le calcul présent (comme il a été montré dans le chapitre 3). Afin de réduire le temps de calcul de l'ordinateur, le temps de modélisation, et le volume du fichier de résultats, seul la moitié de la poutre a été modélisée en raison de la symétrie de la géométrie et les conditions de chargement. Un maillage raffiné est arrangé près de l'extrémité de la plaque en FRP, figures 4.3 et 4.5.

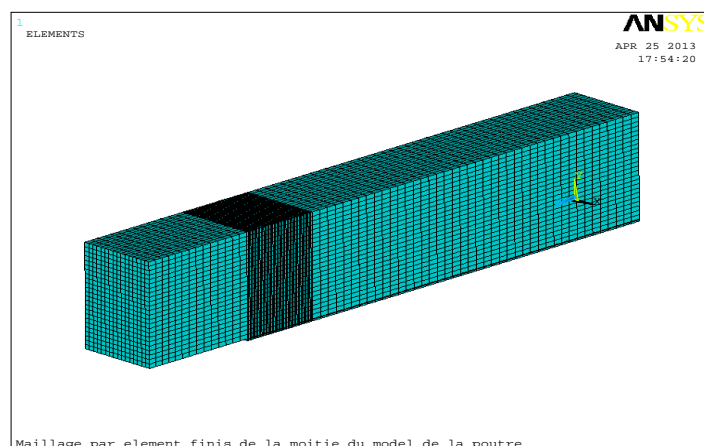


Figure 4.3. Maillage raffiné à l'extrémité de la plaque FRP, poutre rectangle

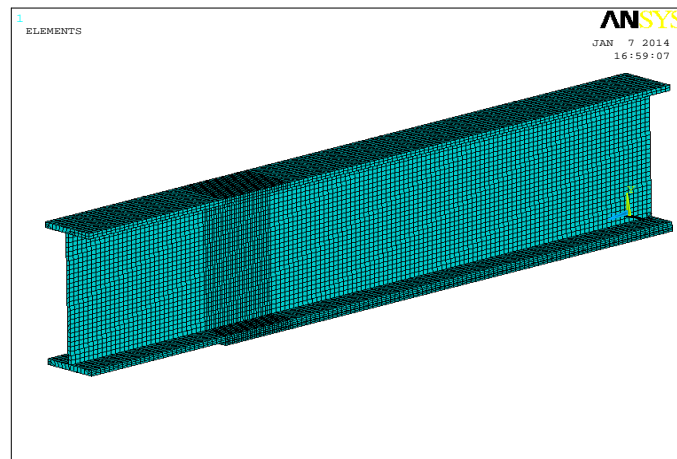


Figure 4.4. Maillage raffiné à l'extrémité de la plaque FRP cas poutre en I

Les propriétés de la géométrie et des matériaux utilisés dans cette étude sont représentés sur la figure 4.1 et aux tableaux 4.1 et 4.2.

Tableau 4.1. Paramètres géométriques et matériels

Composant	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	E (GPa)	ν
Poutre	211.9	544.5	210	0.3
Adhésive	211.9	2	10	0.35
Plaque (FRP)	211.9	12	310	0.3

Tableau 4.2. Paramètres géométriques et matériels de la poutre I en Acier

Composant	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	E (GPa)	ν
Poutre en Acier	300	874	210	0.3
Adhésive	211.9	2	2	0.35
Plaque (FRP)	211.9	2	310	0.3

Une plaque composite en FRP est analysée en première étape par l'utilisation des méthodes analytique et numériques par éléments finis. Les deux poutres ont été soumises au chargement thermique $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$, avec un coefficient de dilatation $\alpha_1=10.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ pour la poutre. $\alpha_2=0$

Les résultats obtenus laissent apparaître une bonne concordance entre la présente méthode et la méthode analytique telle que développée par [22] pour le cas d'un chargement thermique. Les figures 4.7 et 4.8 montrent la distribution des contraintes interfaciales à partir du bord de la plaque en FRP. Elles montrent que les deux solutions par éléments finis (EF) et par analytique sont en bonne corrélation entre eux. Il ya une concentration de contraintes

normales et de cisaillement à l'extrémité de la plaque FRP (figures 4.6 et 4.7), qui entraînent le problème de délaminage à l'interface ou une défaillance.

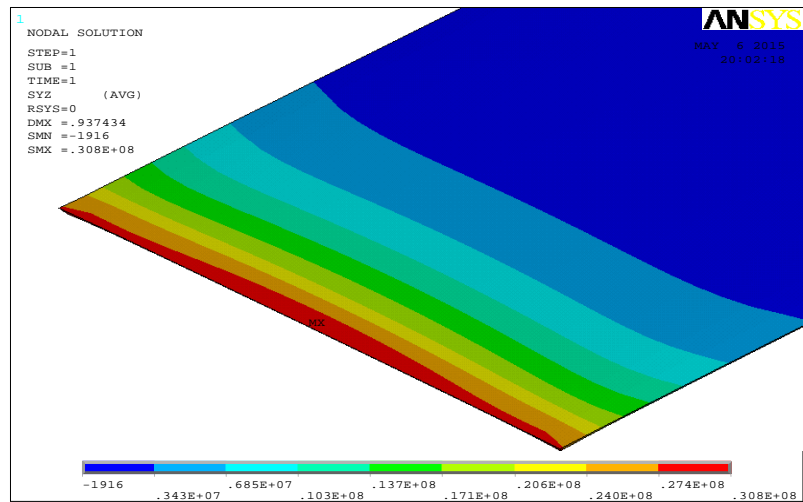


Figure 4.5. Concentration de la contrainte de cisaillement dans l'adhésif

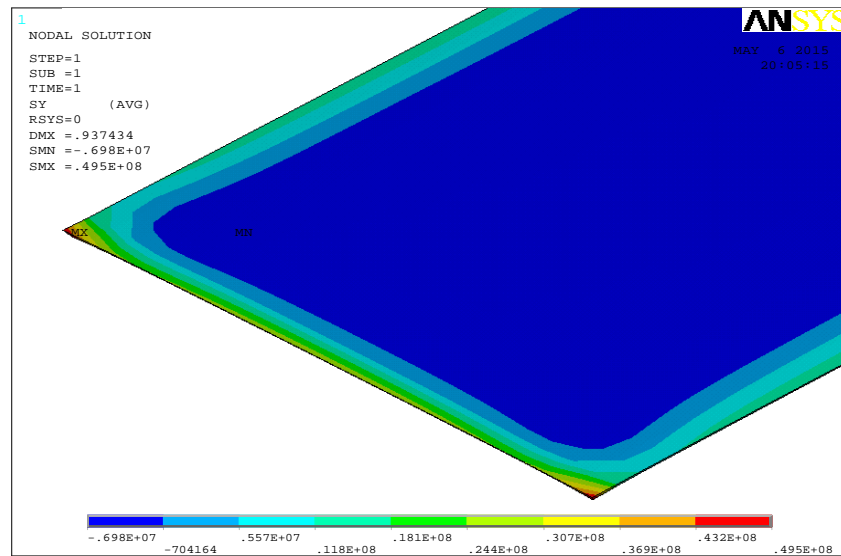


Figure 4.6. Concentration de la contrainte de décollement dans l'adhésif.

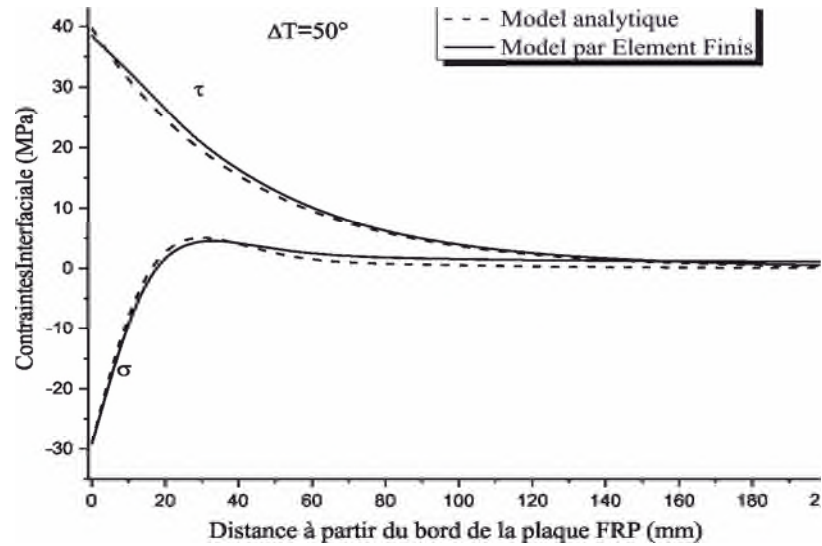


Figure 4.7. Contraintes d'interface pour une poutre rectangulaire renforcée par composite FRP: chargement thermique

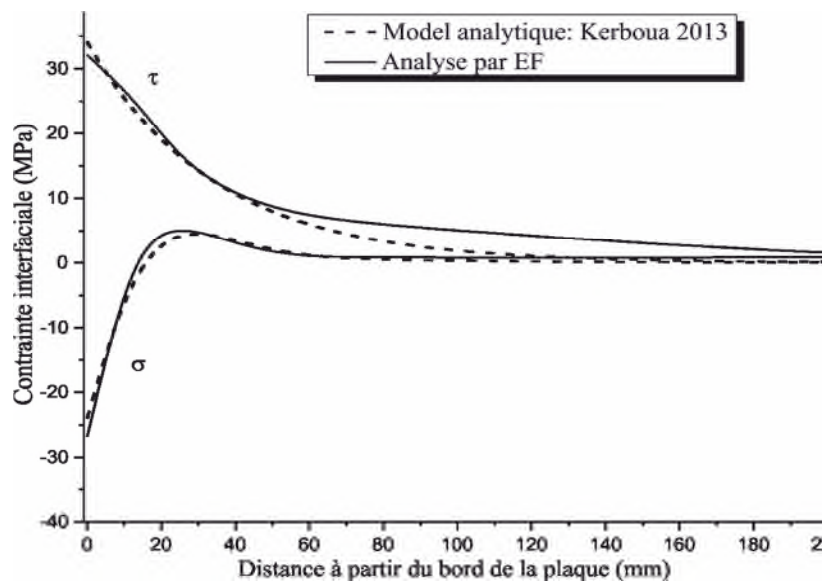


Figure 4.8. Contraintes d'interface pour une poutre en I renforcée par composite FRP: chargement thermique.

4.5. Conclusion

Ce chapitre a mis au point une procédure relativement simple pour analyser par élément finis sous le logiciel « Ansys v.11 » les concentrations de contraintes de cisaillement et les contraintes normales qui se produisent sur les bords de la plaque de FRP dans les poutres renforcées par collage externe des plaques. Un calcul analytique a été élaboré sur la base des travaux antérieurs dans la littérature pour valider la procédure numérique utilisée dans ce chapitre et pour voir la concordance entre les résultats obtenus par les différentes solutions, ce qui démontre que la procédure actuelle est simple et précise.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées sur la base des résultats numériques obtenus en utilisant la nouvelle approche et leur implication dans la conception pratique.

- Les résultats et les analyses montrent l'existence d'une forte concentration de contrainte de cisaillement à l'extrémité de la structure renforcée.
- La méthode proposée est simple et précise. Les résultats obtenus constituent une amélioration de la conception pratique de la fiabilité structurelle et l'augmentation de résistance à la fatigue des structures.
- Ce type de travail permet de donner aux ingénieurs concepteurs une nouvelle vision sur les nouveaux matériaux qui possèdent une grande résistance sous un faible poids.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

L'utilisation des matériaux composites FRP dans la réparation et le renforcement des équipements et structures endommagées a fait l'objet de ce travail. En fait, dans le cadre de la réhabilitation des équipements, le processus de l'introduction des matériaux composites à base de fibres a été accéléré par la mise au point des méthodes techniquement fiables et compétitives comparativement aux anciens procédés de renforcement par les techniques classiques (soudage, boulonnage, rivetage, etc). Les fibres de carbone ou de verre présentent, en effet, divers avantages: faible densité, absence de corrosion, excellentes propriétés mécaniques, très bonne tenue à la fatigue et facilité de manipulation.

Le souci majeur du renforcement par les matériaux composites c'est le problème de décollement aux extrémités de la plaque composite par rapport à la structure renforcée, ceci constitue un début de dégradation de la structure. Si les caractéristiques mécaniques des constituants du système (poutre-adhésif-composites) peuvent être déterminées avec une exactitude suffisante, on peut améliorer les modèles utilisés pour déterminer et calculer ces contraintes et trouver un moyen pour réduire le risque de décollement.

Nous avons définis le matériau composite étant comme une association de deux constituants: d'une part le *renfort* de nature filamentaire (squelette), il assure la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité) et d'autre part *la matrice* (résine organique) qui lie les fibres de renforts avec la répartition des efforts qui assurent la protection chimique.

L'étude bibliographique montre que pour le renforcement de nos structures endommagées, par la technique des fibres de carbone possèdent des meilleures propriétés mécaniques, physiques et chimiques. Les travaux de recherches relatifs à l'étude des structures renforcées par matériaux composites, sont également peu nombreux (surtout dans le calcul des contraintes de décollement).

En effet, un premier modèle numérique sous environnement Ansys a été établi dans le chapitre 3 sur l'hypothèse que la structure est soumise a un chargement mécanique seulement. Ce modèle a permis de revoir à la baisse les contraintes responsables du décollement (délaminage) par rapport aux modèles existant dans la littérature.

Les résultats obtenus par notre modèle numérique montrent une bonne adéquation avec les travaux obtenus dans la littérature, et la différence entre les contraintes interfaciales prévus par la présente méthode et ceux donnés dans la littérature est petite, ce qui constitue l'objectif principal de ce mémoire.

Par rapport aux études précédentes, le présent modèle numérique fournit une prédiction plus précise de la distribution des contraintes interfaciales et une originalité, en tenant compte de la différence des structures.

En deuxième lieu, une modélisation numérique et une nouvelle approche théorique améliorée (chapitre 4) pour le calcul des contraintes pour une poutre renforcée par FRP, en tenant compte du chargement thermique sur la structure. La modélisation numérique a analysé le problème de délaminage, par rapport aux modèles existant dans la littérature qui n'ont pas tenu compte des paramètres critiques tel que l'effet thermique dans les deux modèles de structure.

La comparaison avec les autres solutions a été faite à deux niveaux :

- Cas 1 : chargement mécanique, la méthode a été validée avec celle de ; Smith ST and Teng JG (2001) et donne des résultats identiques.
- Cas 2 : chargement thermique, les résultats obtenus ont été validés avec ceux de Kerboua et al (2013), c'est une méthode développée récemment.

Les résultats obtenus par notre travail numérique montrent une bonne adéquation à ceux obtenus analytiquement dans la littérature.

Enfin, ce travail constitue une contribution à la résolution du problème du décollement dans les structures endommagées et renforcées par des plaques en composites. Cependant cette technique reste encore inexplorée dans son ensemble, plusieurs aspects demeurent encore méconnus ou mal cernés aussi bien pour les utilisateurs, les concepteurs et les chercheurs.

Par ailleurs, plusieurs travaux sont envisagés en guise de perspectives comme.

- L'étude et la prédiction à long terme du comportement des structures renforcées par FRP soumise à plusieurs types de chargement en intégrant leur dégradation par leur environnement.

BIBLIOGRAPHIE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [01] Saliha Kaskas « Etude de l'effet du cisaillement transverse sur le comportement mécanique de poutres composites », mémoire. Université Mentouri Constantine, 2010.
- [02] Michel Chatain « Présentation Générale des Matériaux Composites », Techniques de l'ingénieur, traité Plastique et Composites. A M 5000, 2001.
- [03] Alian Giocosa « Les composites dans l'industrie automobile », Techniques de l'ingénieur, traité Plastique et Composites, AM5600, 2011.
- [04] Jérôme Molimard, Alain Vautrin, Jean Marc Béraud, Patrick Henrat « contribution à la conception d'une structure en matériaux composites en milieu industriel », 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 août 2007.
- [05] Jacques Cinquain « Les composites en aérospatiale », Techniques de l'ingénieur, traité Plastique et Composites, A 5 645.
- [06] Patrick Parneix, Dominique Lucas « Les matériaux composites en construction navale militaire », Communication présentée lors de la réunion des spécialistes RTO AVT sur « Les structures composites à bas coût », Norvège, 2001
- [07] Patrick Parneix, Dominique Lucas « Les matériaux composites en construction navale militaire » Techniques de l'ingénieur, traité Plastique et Composites, AM5660.
- [8] Jean Paul Persy « Réparation par soudure d'ouvrages d'art métalliques anciens » .BLLPC 167. 1990.
- [9] « Travaux de construction en acier » Guide du Maître d'œuvre, SETRA 2001
- [10] Philippe Lecroq « Maintenance et réparation des ponts ». Chapitre 5 : Le projet de réparation ou de renforcement des ponts métalliques. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées – juillet 1997.
- [11] Al Helwagy Mahmoud « Les réparations de ponts métalliques » : « Réparations types et cas concrets de réhabilitations document SNCF » Technologie de renforcement des poutres en béton armé par l'insertion de joncs de carbone, Département Génie Civil. Toulouse, France: INSA-UPS. F. 2007
- [12] « Les réparations de ponts métalliques » Réparations types et cas concrets de réhabilitations document SNCF, 19 nov2010.
- [13] Smith Scot Thomas, Teng Jan Guang « Interfacial stresses in plated beams », *Engineering Structures*, 23, pp.857-871, (2001).

- [14] Jones Roy, Swamy Narayan, Charif Ashraf «Plate separation and anchorage of reinforced concrete beams strengthened by epoxy-bonded steel plates» *The Struct Engr*;66(5):85–94. 1988.
- [15] Roberts Mark, Haji-Kazemi Haralsadat «Theoretical study of the behavior of reinforced concrete beams strengthened by externally bonded steel plates. *Proc Instn Civil Engrs (Part 2)*:39–55. 1989;87.
- [16] Vilnay Oren «The analysis of reinforced concrete beams strengthened by epoxy bonded steel plates” *Int J Cement Compos Lightweight Concrete*;10(2):73–8. 1988.
- [17] Liu Zenghua, Zhu Bailin. «Analytical solutions for R/C beams strengthened by externally bonded steel plates”. *J Tongji Univ*; 22(1):21– 6 (in Chinese). 1994.
- [18] Taljsten Bjorn «Strengthening of beams by plate bonding”. *J Mater Civil Eng, ASCE*; 9(4):206–12. 1997.
- [19] Shen High, Teng Jin Guand, Yang Jian «Interfacial stresses in beams and slabs bonded with a thin plate”. *J Eng Mech, ASCE*, (in press).
- [20] Ansys 11.0, User’s guide version, ANSYS, Inc., Canonsburg, PA; 2001
- [21] Denton Steve, (2001) «Analysis of stresses developed in FRP plated beams due to thermal effects». *In: Proceeding of the Conference on Composites in Civil Engineering 2001, Hong Kong, 12–14 December, pp. 527–536.*
- [22] Bachir Kerboua, Ismail Bensaid and El abbès Addabedia «Analysis of interfacial thermal stresses for damaged structures: new theoretical model ». *Composite Interfaces, Vol. 19, No. 8, pp.533–544.* 2012.

Conclusion générale

L'utilisation des matériaux composites FRP dans la réparation et le renforcement des équipements et structures endommagées a fait l'objet de ce travail. En fait, dans le cadre de la réhabilitation des équipements, le processus de l'introduction des matériaux composites à base de fibres a été accéléré par la mise au point des méthodes techniquement fiables et compétitives comparativement aux anciens procédés de renforcement par les techniques classiques (soudage, boulonnage, rivetage, etc). Les fibres de carbone ou de verre présentent, en effet, divers avantages: faible densité, absence de corrosion, excellentes propriétés mécaniques, très bonne tenue à la fatigue et facilité de manipulation.

Le souci majeur du renforcement par les matériaux composites c'est le problème de décollement aux extrémités de la plaque composite par rapport à la structure renforcée, ceci constitue un début de dégradation de la structure. Si les caractéristiques mécaniques des constituants du système (poutre-adhésif-composites) peuvent être déterminées avec une exactitude suffisante, on peut améliorer les modèles utilisés pour déterminer et calculer ces contraintes et trouver un moyen pour réduire le risque de décollement.

Nous avons définis le matériau composite étant comme une association de deux constituants: d'une part le *renfort* de nature filamentaire (squelette), il assure la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité) et d'autre part *la matrice* (résine organique) qui lie les fibres de renforts avec la répartition des efforts qui assurent la protection chimique.

L'étude bibliographique montre que pour le renforcement de nos structures endommagées, par la technique des fibres de carbone possèdent des meilleures propriétés mécaniques, physiques et chimiques. Les travaux de recherches relatifs à l'étude des structures renforcées par matériaux composites, sont également peu nombreux (surtout dans le calcul des contraintes de décollement).

En effet, un premier modèle numérique sous environnement Ansys a été établi dans le chapitre 3 sur l'hypothèse que la structure est soumise à un chargement mécanique seulement. Ce modèle a permis de revoir à la baisse les contraintes responsables du décollement (délaminage) par rapport aux modèles existant dans la littérature.

Les résultats obtenus par notre modèle numérique montrent une bonne adéquation avec les travaux obtenus dans la littérature, et la différence entre les contraintes interfaciales prévus par la présente méthode et ceux donnés dans la littérature est petite, ce qui constitue l'objectif principal de ce mémoire.

Par rapport aux études précédentes, le présent modèle numérique fournit une prédiction plus précise de la distribution des contraintes interfaciales et une originalité, en tenant compte de la différence des structures.

En deuxième lieu, une modélisation numérique et une nouvelle approche théorique améliorée (chapitre 4) pour le calcul des contraintes pour une poutre renforcée par FRP, en tenant compte du chargement thermique sur la structure. La modélisation numérique a analysé le problème de délaminage, par rapport aux modèles existant dans la littérature qui n'ont pas tenu compte des paramètres critiques tel que l'effet thermique dans les deux modèles de structure.

La comparaison avec les autres solutions a été faite à deux niveaux :

- Cas 1 : chargement mécanique, la méthode a été validée avec celle de ; Smith ST and Teng JG (2001) et donne des résultats identiques.
- Cas 2 : chargement thermique, les résultats obtenus ont été validés avec ceux de Kerboua et al (2013), c'est une méthode développée récemment.

Les résultats obtenus par notre travail numérique montrent une bonne adéquation à ceux obtenus analytiquement dans la littérature.

Enfin, ce travail constitue une contribution à la résolution du problème du décollement dans les structures endommagées et renforcées par des plaques en composites. Cependant cette technique reste encore inexplorée dans son ensemble, plusieurs aspects demeurent encore méconnus ou mal cernés aussi bien pour les utilisateurs, les concepteurs et les chercheurs.

Par ailleurs, plusieurs travaux sont envisagés en guise de perspectives comme.

- L'étude et la prédiction à long terme du comportement des structures renforcées par FRP soumise à plusieurs types de chargement en intégrant leur dégradation par leur environnement.

رÉSUMÉ

Le renforcement des structures métalliques et non métalliques endommagés en utilisant les matériaux composites en fibre est l'une des méthodes récentes dans le domaine de la réparation et de la réhabilitation des structures existantes, ce qui permet de remplacer les méthodes classiques (soudage, rivetage, boulonnage, etc....). Ces dernières techniques ont prouvé leurs complexités et leurs limites dans le sens de résistance aux efforts et à la corrosion.

Cependant, le phénomène de décollement des plaques FRP de renforcement à leurs extrémités du à une forte concentration des contraintes qui peuvent dépasser la valeur ultime de résistance, et ainsi la structure peut se dégrader et se ruiner de façon partielle ou totale. La connaissance et la prédiction de ces contraintes d'interface joue un rôle majeur dans la compréhension du phénomène de décollement pour éviter tout endommagement.

Dans ce mémoire on s'intéresse à la modélisation de ces contraintes d'interface qui sont la cause du phénomène de délaminage au niveau de la structure, à l'aide d'un code de calcul développé sous « Ansys v.11.0 », tout en tenant compte de l'effet à la fois des charges mécaniques et thermiques dans des structures différentes. La modélisation de la contrainte de cisaillement et de la contrainte normale est très significative pour toute étude de renforcement. De nouvelles approches analytiques vont être développées visant à améliorer les modèles déjà existants, et les résultats obtenus seront comparés avec celles du modèle numérique développé dans ce mémoire.

Des études paramétriques vont être réalisées afin de montrer leurs effets sur la concentration des contraintes.

Mots clés: Structure, renforcement, matériaux composites FRP, contraintes interfaciales, décollement, analyse par éléments finis.

Summary

The strengthening of metallic and nonmetallic structures damaged by using fiber composite materials is one of the latest methods in the field of repair and rehabilitation of existing structures, which can replace conventional methods (welding, riveting, bolting, etc. ...). These techniques have proven their complexities and limitations in the direction of stress resistance and corrosion.

However, the separation phenomenon of FRP reinforcement plates at the ends under high concentration of stresses which can exceed the ultimate value of resistance, and so the structure can degrade and ruin of partially or completely. Knowledge or prediction of the interface stress plays a major role in understanding the separation phenomenon to prevent damage.

In this work we are interested in modeling these interface stress that cause delamination phenomena at the level of the structure, using a code developed under "Ansys finite element v.11.0" while taking into account the effect of both mechanical and thermal loads. Modeling lead to determine the shear stress and normal stress concentrated at the end of the reinforcing plate. New analytical approaches have been developed to improve existing models, and to compare with that of the numerical model developed in this study. A parametric study was conducted to show the effects on the stress concentration.

Keywords: structure, reinforcement, FRP composites, interfaciales stress, delamination, finite element analysis.

الملخص

تعزير المعادن الغير حديدية والهياكل التالفة باستخدام الألياف المركبة هي واحدة من أحدث الأساليب في مجال إصلاح وإعادة تأهيل المنشآت القديمة، و التي يمكن أن تحل محل الطرق التقليدية (اللحام، التثبيت بالبراغي، البرشمة، الخ...). وقد أثبتت هذه التقنيات تعقيدها في مقاومة الإجهاد والتآكل.

المشكلة الأساسية للتقنية الجديدة تكمن في نهايات الهياكل المعززة، حيث تكون نسبة عالية من الإجهادات التي يمكن أن تتجاوز مقاومة المعدن، وبالتالي فإن الهيكل يمكن أن ينهار جزئياً أو كلياً.

المعرفة أو التنبؤ بالإجهادات تلعب دوراً رئيسياً في فهم ظاهرة الانهيار للهياكل المعززة. في هذه الأطروحة نقوم بدراسة الإجهادات التي تسبب ظاهرة التدهور على مستوى الهيكل، وذلك باستخدام النموذج الملائم.

مع الأخذ بعين الاعتبار تأثير كل من الحمل الميكانيكية و الحرارية، وقد تم تطوير مناهج تحليلية جديدة لتحسين و باستعمال اللوح العددي ANSYS لحساب تركز الإجهادات النماذج القائمة لمقارنة النتائج مع النموذج العددي، و للحصول على علاقة جيدة بين النماذج.

كلمة البحث:

الإجهادات، الألياف، عناصر التسليح FRP، الهيكل، التعزير، المواد المركبة