

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES

Laboratoire des Matériaux & Hydrologie



FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures & Matériaux

Présentée par

BOUAKKAZ Khaled

Intitulé de la thèse

**ANALYSE ET MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS DU
COMPORTEMENT MECANIQUE DES POUTRES
METALLIQUES RENFORCEES PAR COLLAGE
EXTERNE DES PLAQUES COMPOSITES**

Soutenu le 03/12/2015 devant le jury composé de :

M. A. TOUNSI	Pr	UDL SBA	Président
M. T.H. DAOUADJI	MCA	U DE TIARET	Rapporteur
M.S. A. MEFTAH	Pr	UDL SBA	Co-Rapporteur
M. M. ZIDOUR	MCA	U DE TIARET	Examineur
M. A.BENACHOUR	MCA	UDL SBA	Examineur
M. S. A. HOUARI	MCA	U DE MASCARA	Examineur
M. E. ADDA BEDIA	Pr	UDL SBA	Invité

Année universitaire 2015-2016

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier le Professeur ADDA BEDIA El Abbas, Directeur du Laboratoire de Matériaux et Hydrologie, de la Faculté de Technologie, du Département de Génie Civil de l'Université DJILLALI Liabes de Sidi Bel Abbas. Je le remercie pour la confiance qu'il a accordé à tous les enseignants du Département de Génie Civil de Tiaret, et qui grâce à lui et à ses collaborateurs, et à leur tête le Professeur TOUNSI Abdelouahed, ont fait que l'équipe de notre département ne fait qu'escalader les grades d'année en année. Je lui exprime mon respect, le respect du disciple à son maître pour tout ce qu'il a donné de sa noble personne à la science. Et à lui et à son équipe, et au nom de tous ceux qui se sont formés au sein de leur laboratoire, je leur dis : »Pourrait-on un jour vous remercier ? ».

Ce travail a été élaboré au Laboratoire de Matériaux et Hydrologie, sous la direction de Monsieur HASSAINE DAOUADJI Tahar, Maître de conférences à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret, à qui j'exprime ma profonde gratitude pour les nombreux conseils et remarques qu'il m'a prodigué durant tout ce travail.

Mes mêmes gratifications vont également à mon co-encadreur, le Professeur MEFTAH Sid Ahmed, à qui j'exprime également ma profonde reconnaissance pour les nombreux conseils et remarques qu'il m'a prodigué durant tout ce travail.

J'adresse également mes remerciements les plus vifs au Professeur TOUNSI Abdelouahed, d'avoir bien voulu trouver de son précieux temps et m'honorer en acceptant de présider mon jury de soutenance.

Mes remerciements vont également à Messieurs Zidour Mohamed, Benachour Abdelkader et Houari Sid Ahmed pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner ce travail et pour leur amabilité de faire le déplacement pour assister à ma soutenance.

Enfin, et pour le Département de Génie Civil de l'Université IBN Khaldoun de Tiaret, je remercie M. Hadji Lazreg, qui m'a orienté vers ce laboratoire, ainsi que mes collaborateurs et tous mes confrères enseignants et responsables, en particulier MM. BENSATALLAH Tayeb, TLIDJI Youcef et AIT AMEUR MEZIANE Mohamed, qui à aucun moment, n'ont hésité à m'apporter leur aide et soutien pour la bonne préparation de cette thèse.

J'exprime aussi une mention spéciale à Mademoiselle Houria, secrétaire du même laboratoire, pour les nombreux services qu'elle rend à tous les doctorants sans distinction.

Dédicaces

A la mémoire de mes parents ;

A ma femme ;

A mes enfants.

Résumé

L'utilisation de polymères renforcés par fibres de carbone composites (Carbon Fiber Reinforced Polymers) pour réhabiliter ou renforcer les structures, et en particulier, de prolonger la vie des poutres d'acier a de diverses applications. L'un des principaux aspects de la technologie de renforcement par collage est l'analyse des contraintes de la structure renforcée. En particulier, une évaluation fiable de la contrainte de cisaillement de l'adhésif et de la contrainte dans les plaques de CFRP est obligatoire afin de prédire la charge de rupture des poutres.

Dans cettethèse, un développement analytique et une analyse par éléments finis sontprésentées pour calculer les contraintes dans la poutre renforcée sous des charges mécaniques. Les résultats obtenus ont été comparés avec ceux de la méthode analytique de Tounsi, et une série d'études paramétriques a été réalisée pour montrer comment les contraintes interraciales maximales sont influencées par l'épaisseur de la couche d'adhésif,par la fraction volumique de fibres et par l'effet hygrothermique.

Mots-clés :Méthode des éléments finis ; Poutre en acier ;Contraintes d'interface ;Renforcement ;plaque CFRP hygrothermiques âgées.

Abstract

The use of carbon fiber reinforced polymers (CFRP) composites to upgrade structures and, in particular, to extend the lives of steel beams has wide applications. One of the main aspects of the bonded strengthening technology is the stress analysis of the reinforced structure. In particular, reliable evaluation of the adhesive shear stress and of the stress in the CFRP plates is mandatory in order to predict the beam's failure load.

In this thesis, an analytical development and a finite element analysis are presented to calculate the stresses in the reinforced beam under mechanical loads. The obtained results were compared with the those of Tounsi's analytical approach, and a serial of parametric studies were carried out to show how the maximum interfacial stresses have been influenced by the thickness of adhesive layer, by the fiber volume fraction and hygrothermal effect.

Keywords: Finite elements analysis; Steel beam; Interfacial stresses; Strengthening; Hygrothermal aged CFRP plate.

ملخص

ان استخدام البوليمر المقوى بالألياف الكربونية المركبة (Carbon Fiber Reinforced Polymers) من اجل إعادة تأهيل (ترميم) أو تعزيز الهياكل، وعلى وجه الخصوص، لتمديد حياة الروافد الفولاذية في تطبيقاتها المختلفة. أحد الجوانب التكنولوجية الرئيسية لتعزيز العوارض باللصق هو تحليل الإجهاد للهيكمل المقوى. على وجه الخصوص، تقييم موثوق به وإلزامي لإجهاد القص للاصقة والاجهادات في لوحات CFRP من أجل التنبؤ بتحمل الانهيار الروافد.

في هذه الأطروحة، تطوير تحليلي رقمي بالعناصر المحدودة معروضة لحساب الاجهادات في الرافدة تحت تأثير الأحمال الميكانيكية. وتمت مقارنة النتائج المحصل عليها مع النتائج المحصل عليها من طرف تونسي، ونفذت سلسلة من الدراسات المتغيرة لإظهار كيف تنتشر أقصى الاجهادات الوجهية بسلك طبقة اللصق، نسبة الحجمية للألياف وتأثير الرطوبة الحرارية.

الكلمات المفتاحية: طريقة العناصر المحدودة؛ رافده فولاذية؛ الاجهادات الوجهية؛ تعزيز؛ اللوحات CFRP الكبيرة العمر تحتلرطوبة الحرارية

Sommaire

Remerciements	i
Dédicaces	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
ملخص	v
Sommaire	
Liste des abréviations et des notations	vi
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Introduction générale	1
Chapitre I Pathologies, Renforcements et Modes de rupture des structures métalliques	
I.1 Introduction	3
I.2 Pathologies et principales causes de désordre	3
I.2.1 Dégradation des matériaux	4
I.2.1.1 Erosion, abrasion et chocs.....	4
I.2.1.2 Action des cycles de gel-dégel.....	4
I.2.1.3 Altération physico-chimique du béton.....	4
I.2.1.4 Retrait du béton	4
I.2.1.5 Corrosion des armatures métalliques	5
I.2.1.6 La fatigue	5
I.2.2 Erreurs de conception ou d'exécution	5
I.2.3 Modification des conditions d'exploitation des ouvrages	6
I.3 Méthodes et techniques de renforcement	7
I.3.1 Méthodes de réparation non structurales	8
I.3.2 Méthodes de réparation et/ou renforcement structurales.....	9
I.4 Les différents schémas de renforcement d'une poutre métallique en I	9
I.5 Modes de rupture des poutres métalliques renforcées par matériaux composites	9
I.5.1 Rupture due à la traction de la poutre métallique ou du composite.....	11
I.5.2 Rupture due à la compression de la poutre métallique.....	11
I.5.3 Rupture due au décollement de la plaque composite de renforcement.....	12
I.5.4 Rupture due au cisaillement aux extrémités de la poutre métallique en I.....	13

I.6 Conclusion	13
-----------------------------	-----------

Chapitre II Généralités sur les matériaux composites

II.1 Introduction.....	15
II.2 Description des constituants élémentaires des composites.....	16
II.2.1 Les fibres de renfort	17
II.2.1.1 Les fibres de Carbone	17
II.2.1.2 Les fibres de Kevlar.....	18
II.2.1.3 Les fibres de Verre.....	18
II.2.1.4 Autres types de fibres.....	19
II.2.2 Les matrices.....	20
II.2.2.1 Les matrices organiques	20
II.2.2.1.1 Résines thermodurcissables.....	20
II.2.2.1.2 Résines thermoplastiques	21
II.2.2.2 Les matrices minérales	21
II.2.3. Les charges et les additifs.....	22
II.2.4. Les adhésifs	22
II.3. Procédés de fabrication et de mise en œuvre	24
II.3.1. Stratification directe de tissu sec (fabrication in-situ)	24
II.3.2 Collage de plaques composites (système préfabriqué)	25
II.3.3. Enroulement filamentaire	27
II.4. Influence de l'environnement sur le comportement des composites.....	28
II.4.1. Influence de la température.....	28
II.4.2 Influence de l'humidité	29
II.4.3. Influence des ultraviolets	30
II.4.4. Influence du fluage et de la corrosion sous contrainte.....	30
II.5. Propriétés des matériaux composites	30
II.6. Conclusion	32

Chapitre III Théorie des plaques stratifiées

III.1. Introduction.....	33
III.2 Théorie des plaques stratifiées	33
III.2.1. Nomenclature d'une structure stratifiée :	34
III.2.2 Définitions et notations décrivant les séquences d'empilement d'un stratifié	35
III.2.3. Hypothèses de calcul de la théorie des stratifiés :	36

III.2.4. Relation déformation–déplacement	37
III.2.5. Forces résultantes et moments agissant sur un stratifié	40
III.2.6. Rigidité du stratifié :	42
III.3. Orientation des fibres-Analyse	43
III.4. Conclusion	46

Chapitre IV Analyse et modélisation des poutres métalliques renforcées par collage de plaques composites

IV.1. Introduction	47
IV.2 Hypothèse de la présente méthode.....	48
IV.3. Analyse.....	49
IV.3.1. Les déformations.....	50
IV.3.2 Distribution des contraintes de cisaillement dans l'interface composite–Acier	52
IV.3.3. Application des conditions aux limites.....	55
IV.3.4. Distribution des contraintes normales dans l'interface composite–Acier.....	58
IV.4. Validation de la méthode.....	60
IV.4.1. Cas d'une plaque de renforcement.....	60
IV.4.2 Cas d'une stratification de la plaque.....	63
IV.4.2.1. Variation du stratifié	63
IV.4.2.2 Variation de l'orientation des fibres composites	65
IV.4.3. Rigidité des plaques CFRP, GRFP et métallique	66
IV.4.3.1 Chargement uniforme.....	67
IV.4.3.2. Chargement ponctuel concentré au milieu	68
IV.5. Conclusion	69

Chapitre V Analyse numérique des poutres métalliques renforcées par matériaux composites

V.1. Introduction	71
V.2 Analyse en éléments finis.....	71
V.3. Comparaison avec les résultats expérimentaux	74
V.4. Comparaison avec les résultats d'analyse analytique - Discussion.....	74
V.5. Conclusion	79

Conclusion Générale et Perspectives	81
Références Bibliographiques	83

Liste des abréviations et des notations

Abréviations :

FRP : FiberReinforced Polymer

HR : Haute Résistance

HM : Haut Module

IM : Module Intermédiaire

CFRP: Carbon Fiber Reinforced Polymer

GFRP: Glass FiberReinforced Polymer

BA: Béton-armé

NF P 95-101: Norme Française Page 95-101

MEF : Méthode des éléments finis

FEM : Finite elements method

PM : Présente méthode

Notations :

R_f : Résistance à la rupture des fibres

E_{oT} : Module d'Young.

A_R : Allongement à la rupture

T_g : Température de transition vitreuse

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

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

b_0 : Epaisseur de l'âme du profilé en I

t_0 : Epaisseur de la semelle du profilé en I

b_1 : Largeur de la poutre métallique

b_2 : Largeur de la plaque composite

t_1 : Hauteur de la poutre métallique

$\varepsilon_1^N(x)$ et $\varepsilon_2^N(x)$: Déformations normales de la poutre IPE et de la plaque composite

$\varepsilon_1^M(x)$ et $\varepsilon_2^M(x)$: Déformations induites par le moment fléchissant de la poutre métallique et la plaque composite

- $\varepsilon_1(x)$ et $\varepsilon_2(x)$: Déformations de la poutre métallique et de la plaque composite
- $u_1(x)$ et $u_2(x)$: Déplacements longitudinaux à la face inférieure de l'acier 1 et à la face supérieure de la plaque composite 2
- y_1 et y_2 : Distances entre la face inférieure de l'adhérent 1 et la face supérieure de l'adhérent 2 et leurs centres de gravité respectifs
- $\tau(x)$: Contrainte de cisaillement
- $\sigma_n(x)$: Contrainte normale
- $M_1(x)$ et $M_2(x)$: Moments fléchissant de la poutre en acier 1 et la plaque composite 2
- E_1 , E_2 et E_a : Modules d'élasticité longitudinaux de l'acier 1, de la plaque composite 2 et de l'adhésif_a
- I_1 et I_2 : Moments d'inertie de la poutre métallique 1 et du composite 2
- A_1 et A_2 : Sections transversales de la poutre métallique 1 et du composite 2
- $N_1(x)$ et $N_2(x)$: Forces axiales de l'acier 1 et de la plaque composite 2
- $V_1(x)$ et $V_2(x)$: Efforts tranchants appliqués dans la poutre métallique 1 et dans la plaque composite 2
- x : Distance comptée à partir du bord de la plaque composite ou de la plaque en acier
- $\tau_a(x)$: Contrainte de cisaillement au niveau de la couche adhésive
- ξ : Coefficient qui tient compte de la forme géométrique de la section en I de la poutre métallique étudiée
- K_s : Rigidité au cisaillement de la couche d'adhésif
- G_a : Module de cisaillement de la couche d'adhésif
- t_a : Epaisseur de la couche d'adhésif
- R : Coefficient de proportionnalité
- $M_T(x)$: Moment de la poutre hybride
- G_1 et G_2 : Modules de cisaillement de la poutre métallique 1 et de la plaque composite 2
- ν_1 : Coefficient de poisson de l'acier
- ν_a : Coefficient de poisson de l'adhésif
- B_1 et B_2 : Constantes d'intégration
- K_n : Rigidité normale de l'adhésif par unité de longueur

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

L : Longueur de la poutre métallique

L_p : Longueur de la plaque de renforcement composite

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

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

q : Charge uniformément répartie

P : Charge ponctuelle

ε_x^0 et ε_y^0 : Déformations normales du plan médian du stratifié

γ_{xy}^0 : Distorsion du plan médian du stratifié

k_x et k_y : Courbures de flexion du stratifié

k_{xy} : Courbure de torsion du stratifié

σ_x, σ_y et τ_{xy} : Contraintes dans le repère du stratifié

\bar{Q}_{ij} : Matrice de raideur du pli dans le repère du stratifié

Z : Cote du pli (k) choisie à partir du plan médian

N_x, N_y et N_{xy} : Forces par unité de longueur

M_x, M_y et M_{xy} : Moments par unité de longueur

$[A_{ij}]$, $[B_{ij}]$ et $[D_{ij}]$: Matrice de membrane, Matrice de couplage membrane-flexion et Matrice de flexion

D'_{11} : Premier terme de la matrice inverse $[D'_{ij}]$ de la matrice de flexion $[D_{ij}]$

A'_{11} : Premier terme de la matrice inverse $[A'_{ij}]$ de la matrice de membrane $[A_{ij}]$

$[\theta]$: Angle d'orientation de la couche considérée

Vf : fraction volumique des fibres dans le polymère

C : Moisissure

Liste des figures

Chapitre I Pathologies, Renforcements et Modes de rupture des structures métalliques

Figure I.1 : Schématisation des désordres en trois groupes de famille 7
 Figure I.2 : Rupture en tension de la poutre en I 11
 Figure I.3 : Rupture en tension de la plaque composite..... 11
 Figure I.4 : Instabilité locale par rupture en compression de la poutre en I 12
 Figure I.5 : Décollement de la plaque 13
 Figure I.6 : Rupture en cisaillement 13

Chapitre II Généralités sur les matériaux composites

Figure II.1 : Relation contrainte-déformation en traction pour un composite et ses différents composants 16
 Figure II.2 : Histogramme des résistances à la rupture en traction des différentes catégories de fibres 19
 Figure II.3 : Mise en œuvre par stratification directe 25
 Figure II.4 : Procédé par collage de plaques d’après Sika Carbodur 26
 Figure II.5 : Renforcement par fibres filamenteuses, enroulement automatisé 27
 Figure II.6 : Température de transition vitreuse d’après Hollaway 28
 Figure II.7 : Influence de la température et de l’humidité sur les caractéristiques mécaniques d’une résine époxy d’après Hollaway 29
 Figure II.8 : Propriétés spécifiques de systèmes composites par rapport à l’acier 32

Chapitre III Théorie des plaques stratifiées

Figure III.1 : Composite stratifié 33
 Figure III.2 : Nomenclature d’un stratifié – Orientation d’un pli 34
 Figure III.3 : Géométrie de déformation d’après Tounsi 37
 Figure III.4 : Schématisation de la répartition des efforts dans le stratifié 40
 Figure III.5 : Forces et moments résultants 41

Chapitre IV Analyse et modélisation des poutres métalliques renforcées par collage de plaques composites

Figure IV.1 : Poutre métallique en I simplement appuyée renforcée par une plaque composite..... 49
 Figure IV.2 : Un segment différentiel de la poutre métallique renforcée par collage de plaque composite..... 50
 Figure IV.3 : Poutre sous une charge uniformément répartie q 56
 Figure IV.4 : Poutre sous une charge ponctuelle P 57
 Figure IV.5 : Poutre sous deux charges ponctuelles symétriques : P 57
 Figure IV. 6 : Validation de la présente méthode pour le cas d’une charge uniformément répartie 62
 Figure IV. 7 : Validation de la présente méthode pour le cas d’une charge concentrée au milieu ... 63
 Figure IV. 8 : Comparaison des contraintes d’interface pour un chargement uniforme en fonction du nombre de couches du composite 64
 Figure IV. 9 : Comparaison des contraintes d’interface pour un chargement uniforme en fonction du nombre de couches et de l’épaisseur 64

Figure IV. 10 : Variations des contraintes d'interfaces maximales en fonction de l'angle d'orientation θ	65
Figure IV. 11 : : Comparaison des contraintes d'interface de cisaillement en fonction de l'orientation de chaque couche (combinaisons d'orientation)	66
Figure IV. 12 : Comparaison des contraintes d'interface normales en fonction de l'orientation de chaque couche (combinaisons d'orientation)	67
Figure IV. 13 : Comparaison des contraintes d'interface de cisaillement des plaques de renforcement CFRP, GRFP et métallique, pour une charge uniformément répartie	67
Figure IV. 14 : Comparaison des contraintes d'interface normales des plaques de renforcement CFRP, GRFP et métallique, pour une charge uniformément répartie.....	68
Figure IV. 15 : Comparaison des contraintes d'interface de cisaillement des plaques de renforcement CFRP, GRFP et métallique, pour une charge concentrée au milieu	68
Figure IV. 16 : Comparaison des contraintes d'interface normales des plaques de renforcement CFRP, GRFP et métallique, pour une charge concentrée au milieu	69

Chapitre V Analyse numérique des poutres métalliques renforcées par matériaux composites

Figure V.1 : Maillage en éléments finis de la moitié du modèle poutre d'acier en I.....	72
Figure V.2 : Comparaison des contraintes de cisaillement dans une poutre en BA renforcée par une plaque métallique avec les résultats de Jones	75
Figure V. 3 : Comparaison des contraintes de cisaillement dans une poutre en BA renforcée par une plaque métallique avec les résultats de Jones	75
Figure V. 4 : Comparaison des contraintes d'interface, normales et de cisaillement, du modèle en éléments finis d'une poutre d'acier en I renforcée par plaque en fibre de carbone, avec les résultats analytiques.....	76
Figure V. 5 : Effet hygrothermique sur les variations des contraintes d'interface dans une poutre d'acier en I renforcée par une plaque de fibre de carbone avec $V_f = 0.7$	77
Figure V. 6 : Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésif sur les contraintes d'interface dans une poutre d'acier en I renforcée par une plaque de fibre de carbone avec $V_f = 0.7$, $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ et $\Delta C = 0\%$	78
Figure V. 7 : Effet de la fraction volumique des fibres sur les variations des contraintes d'interface normales et de cisaillement de l'adhésif dans une poutre d'acier en I renforcée avec une plaque en fibre de carbone CFRP, avec $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ et $\Delta C = 0\%$	78

Liste des tableaux

Chapitre I Pathologies, Renforcements et Modes de rupture des structures métalliques

Tableau I.1 : Différents schémas de renforcement d'une poutre métallique en I	9
---	---

Chapitre II Généralités sur les matériaux composites

Tableau II.1 : Propriétés des fibres de carbone	17
Tableau II.2 : Propriétés des fibres de Kevlar	18
Tableau II.3 : Propriétés des fibres de Verre	19
Tableau II.4 : Propriétés des Résines thermodurcissables	21
Tableau II.5 : Caractéristiques typiques de l'adhésif d'époxy	23

Chapitre III Théorie des plaques stratifiées

Tableau III.1 : Exemples des notations d'un stratifié d'après Smith.....	36
--	----

Chapitre IV Analyse et modélisation des poutres métalliques renforcées par collage de plaques composites

Tableau IV.1 : Propriétés géométriques et mécaniques des matériaux.....	60
Tableau IV.2 : Paramètres des charges et dimensions	61
Tableau IV.3 : Comparaisons des contraintes maximales	61

Chapitre V Analyse numérique des poutres métalliques renforcées par matériaux composites

Tableau V.1 : Matériaux et caractéristiques géométriques utilisés dans les analyses analytique et numérique.....	73
Tableau V.2 : Caractéristiques géométriques et propriétés du matériau utilisées pour la comparaison avec les résultats expérimentaux	74

Introduction générale

Au début du 20^{ème} siècle, avec la naissance réelle de l'industrialisation cimentaire et les facilités de construction offertes par le béton et l'acier, l'activité du secteur du bâtiment et des travaux publics représentait essentiellement la réalisation du neuf. La maintenance n'a été pour une bonne période qu'une tâche de second ordre. Ceci se justifiait d'une part du fait que les ouvrages n'avaient pas encore atteint leur durée de vie ; et d'autre part car les efforts des intervenants dans le domaine du génie civil étaient orientés particulièrement vers la conception et l'innovation des procédés de construction. Ce n'est que vers les années soixante-dix, en raison de l'augmentation des dépenses d'entretien du patrimoine bâti que la nécessité d'organiser et de rationaliser la maintenance s'est imposée.

Les ouvrages ont une durée de vie après laquelle ils vieillissent et s'endommagent. Alors que le remplacement d'une structure est généralement une solution coûteuse, les techniques de réhabilitation (réparation ou renforcement) fournissent des solutions de rechange attrayantes à la construction. Il est alors nécessaire d'apprécier avec justesse la nature, l'étendue et le degré de gravité des pathologies, avant de recommander les mesures préventives ou curatives les plus appropriées. La réhabilitation peut prolonger la vie d'une structure ; si un bâtiment ou un pont doivent être remplacés, les réparations provisoires peuvent prolonger la durée de vie d'une structure à l'état critique jusqu'à ce qu'un remplacement soit opérationnel.

Diverses techniques de réhabilitation ont été développées, le béton projeté, la précontrainte additionnelle ou encore le collage de tôles d'acier se pratiquent déjà.

Ensuite, une autre solution (déjà en application) pour accroître la durabilité et les performances à long terme des infrastructures consiste à intégrer les matériaux composites. Plusieurs projets de démonstration touchant particulièrement les ponts et passerelles ont été réalisés à travers le monde.

Le renforcement par collage externe des plaques composites est l'une des méthodes les plus efficaces utilisées actuellement mais présente un problème majeur qui est le décollement de la plaque due à la concentration des contraintes au niveau de l'interface (adhérents-adhésif).

Notre présent travail de recherche a donc pour objectif l'analyse des contraintes d'interfaces dans une poutre d'acier en I renforcée par une plaque collée en matériaux composites.

Une étude paramétrique sera menée relativement au cas de charges uniformément réparties ainsi qu'aux caractéristiques mécaniques et géométriques afin de quantifier l'influence de chaque facteur sur les contraintes d'interfaces.

La présente thèse est composée de cinq chapitres répartis comme suit :

- Une introduction générale rappelant le contexte général de la problématique ainsi que les objectifs à atteindre ;
- Un premier chapitre décrivant, à travers une étude bibliographique, les pathologies observées ainsi que quelques types de renforcement. Puisque l'élément étudié dans notre travail est une poutre métallique, il sera également exposé dans ce chapitre les modes de rupture des poutres métalliques en I renforcées couramment rencontrés ;
- Un deuxième chapitre est consacré à une revue d'ensemble sur les matériaux composites et leurs différentes propriétés ;
- Un troisième chapitre faisant l'objet d'une description de la théorie des stratifiés et l'orientation de ces derniers qui ne doit pas être négligée dans l'étude des contraintes d'interface ;
- Un quatrième chapitre présentant un développement analytique pour le calcul des contraintes d'interface acier/composite, pour le cas des poutres métalliques renforcées en flexion par collage externe de plaque en matériaux composites. La validation de notre modèle est effectuée par comparaison avec celui de Tounsi [44]. Une étude comparative est également présentée dans ce chapitre.

Pour cela, nous avons utilisé le logiciel commercial « Abaqus version 6.12 ». Cette modélisation est présentée pour valider, une fois encore et si besoin est, la méthode présentée par Tounsi [44].

- Enfin un cinquième chapitre consacré à une modélisation numérique avec la méthode des éléments finis. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel commercial « Abaqus version 6.12 ». Cette modélisation est présentée pour valider, une fois encore et si besoin est, la méthode présentée par Tounsi [44].

Chacun de ces chapitres est couronné par une conclusion partielle, dont le bilan est effectué en conclusion générale, permettant ainsi d'envisager des perspectives aux travaux présentés.

Chapitre I

Pathologies, Renforcements et Modes de rupture des structures métalliques

I.1 Introduction

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

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

Durant de nombreuses années déjà, le renforcement par matériaux composites est utilisé avec succès pour la réparation des structures métalliques [1]. Dans le domaine de génie civil, le renforcement par FRP est aussi bien utilisé pour le renforcement que pour la réparation des structures (poutres en acier, en béton et en bois) et pour tout type de structures à conditions de connaître ses caractéristiques mécaniques.

Un certain nombre d'études basées sur différentes approches a été réalisé pour évaluer l'efficacité des matériaux composites pour le renforcement et la réparation des ponts et des structures en acier, y compris la réparation des poutres métalliques surchargées [2], la réparation des poutres naturellement détériorées [3], le renforcement des poutres intactes [4] et la réparation des poutres avec des dommages induits par la corrosion[5].

Ceci nous conduit à présenter dans ce chapitre les pathologies et les principales causes de désordre, suivi de quelques types de renforcement et enfin les modes de ruptures des poutres métalliques renforcées par les matériaux composites.

I.2 Pathologies et principales causes de désordre

La plupart des structures sont soumises à des conditions environnementales difficiles (pluie, gel, sels de divers glaçage, etc.) et certaines d'entre elles amenées à supporter des surcharges importantes. De ce fait, les pathologies les plus fréquemment rencontrées sont dues à l'étanchéité des matériaux et à la corrosion des armatures. Pour les ossatures de ponts en béton armé, les défauts de compacité de ce dernier facilitent la pénétration des agents agressifs comme les chlorures ou les sels de divers glaçage, constituant ainsi la cause la plus importante de dégradation.

I.2.1 Dégradation des matériaux

Le comportement mécanique et les propriétés physiques du béton et des aciers sont susceptibles de se dégrader dans le temps en fonction des conditions d'environnement définies par la localisation géographique de l'ouvrage.

Les principaux phénomènes induisant ce vieillissement sont les suivants[6] :

I.2.1.1 Erosion, abrasion et chocs

Les ouvrages se situant en milieu fluvial et maritime sont les plus touchés par ce phénomène. L'action des courants, des vagues et des marées les soumettent au charriage d'éléments solides. Le béton se trouve ainsi dégradé par la création de défauts géométriques de surface, l'apparition d'épaufrures et par des éclatements superficiels qui entraînent la mise à nu des armatures et l'accélération des risques de corrosion.

I.2.1.2 Action des cycles de gel-dégel

Plus le taux de porosité et de perméabilité des bétons est important et plus l'eau peut s'y infiltrer et, sous l'action du gel, gonfler, générer des contraintes internes et créer des fissures [7]. Cette dégradation est amplifiée par les chocs thermiques causés par l'apport de chaleur dû à la fusion de la glace.

I.2.1.3 Altération physico-chimique du béton

Différents mécanismes de dégradation du béton sont dus à l'eau et l'hygrométrie des conditions ambiantes. L'eau, lors de sa percolation du béton, dissout des constituants tels que la chaux augmentant ainsi la porosité de ce dernier.

Si, de plus, l'atmosphère est chargée d'anhydride sulfureux, le béton voit sa résistance mécanique diminuer et son niveau d'alcalinité chuter. Cette perte d'alcalinité peut aussi être induite par la carbonatation du béton [8].

L'alcali-réaction entre les granulats et le ciment est une autre cause de vieillissement du béton [9]. La formation de gels expansifs qui en découle se traduit par un gonflement du béton et par le développement de fissures.

Enfin, les pertes de performances du béton favorisent la corrosion des armatures sous l'action combinée de l'eau et des chlorures.

I.2.1.4 Retrait du béton

Lors du processus de prise, l'élimination de la quantité d'eau excédentaire dans la formulation d'un béton lui assurant une bonne ouvrabilité, se traduit par des variations

dimensionnelles de ce dernier. Le retrait, gêné par la présence d'armatures, a tendance à solliciter le béton en traction dès son plus jeune âge et, par conséquent, à créer des fissures.

I.2.1.5 Corrosion des armatures métalliques

Les différentes causes de fissuration du béton précitées, limitent la protection des armatures et favorisent la dégradation des aciers passifs ou des câbles de précontrainte en diminuant l'alcalinité de ce dernier et en favorisant l'action des chlorures. Le gonflement des armatures, par formation de rouille, qui en résulte, a tendance à accélérer les mécanismes de fissuration du béton.

I.2.1.6 La fatigue

Les structures soumises à des charges variables répétées peuvent subir un endommagement se manifestant par la propagation de fissures. Cet endommagement est appelé fatigue et se traduit par une perte de résistance au cours du temps.

Dans le domaine de la fatigue, de nombreuses recherches [10-12] ont été effectuées. Il a ainsi été démontré que l'effet combiné des anomalies et des concentrations de contrainte pouvait être la source de la formation et de la propagation d'une fissure de fatigue, même si les contraintes appliquées restaient largement en dessous de la limite d'élasticité du matériau (les contraintes calculées sans tenir en compte d'éventuelles concentrations de contraintes ou de contraintes résiduelles).

I.2.2 Erreurs de conception ou d'exécution

Ce sont des désordres induits par des erreurs intervenant au stade du dimensionnement de l'ouvrage, ou lors de son exécution.

Concernant la phase de dimensionnement, les causes de fissuration et de dégradation de la structure sont généralement induites par de graves erreurs dans la vérification de la stabilité de l'ouvrage et des conditions de résistance ou, plus simplement, par la prise en considération d'hypothèses erronées au niveau des conditions de chargement, d'environnement et de fonctionnement de l'ouvrage.

Ces erreurs sont généralement à l'origine d'un mauvais dimensionnement des sections et d'une disposition non satisfaisante des armatures se traduisant par des localisations de fissures ou de ruptures non acceptables.

Parmi les conditions particulièrement mal évaluées, il est possible de faire état de l'action de la température sur un ouvrage, de la mauvaise estimation des efforts de précontrainte due à

des erreurs de tracé mais aussi à des données erronées sur la relaxation des câbles et sur leur interaction avec la structure (frottement).

Très souvent, un mauvais dimensionnement des cadres et de leur espacement pour reprendre les efforts tranchants en béton armé est à l'origine de fissuration des ouvrages qui nécessitent une réhabilitation immédiate.

Enfin, une estimation imparfaite des conditions de sollicitations cycliques des ouvrages et des lois de comportement en fatigue des matériaux est susceptible de remettre en cause les résultats de calcul et le dimensionnement pour une durée de vie escomptée. Nous pouvons citer, plus particulièrement, l'incidence d'une mauvaise identification des lois de comportement des armatures passives ou actives et des bétons, sous des actions combinées (fatigue et corrosion) sur la stabilité des ouvrages et sur l'apparition de zones d'endommagement.

Pour ce qui est des erreurs d'exécution justifiant une intervention au niveau de l'ouvrage, on peut citer la mauvaise formulation du béton engendrant une porosité trop élevée, les imperfections de coffrage (trop minces, déformables), les défauts de bétonnage, les incohérences du ferrailage (manque de recouvrement, l'insuffisance d'enrobage, absence d'armature de peau) ou les conditions non satisfaisantes de décoffrage, de transport et de manutention.

I.2.3 Modification des conditions d'exploitation des ouvrages

Le renforcement ou l'amélioration de la portance d'un ouvrage est justifié par l'évolution du trafic.

La modification des charges réglementaires par essieu et/ou celle de la fréquence des sollicitations ou une sous-évaluation des charges d'exploitation induisent l'évolution des conditions de chargement qui s'exercent sur une voirie.

Il faut aussi évoquer la nécessité, dans certains cas, de prendre en considération des sollicitations extrêmes (climatiques ou accidentelles). C'est notamment le cas de la mise en conformité des ponts ou bâtiments vis-à-vis des sollicitations sismiques où un séisme, même léger, peut être la source de désordres importants où le renforcement de certains éléments de l'ossature, telles que les piles de ponts et les poutres latérales, est essentiel vis-à-vis des sollicitations accidentelles telles que les chocs l'impact des véhicules[13].

Notons aussi, que des tassements différentiels des fondations peuvent entraîner à leur tour des fissurations.

Ainsi nous pouvons regrouper les principales causes de désordres affectant les ouvrages en trois grandes classes comme le montre la figure I.1 :

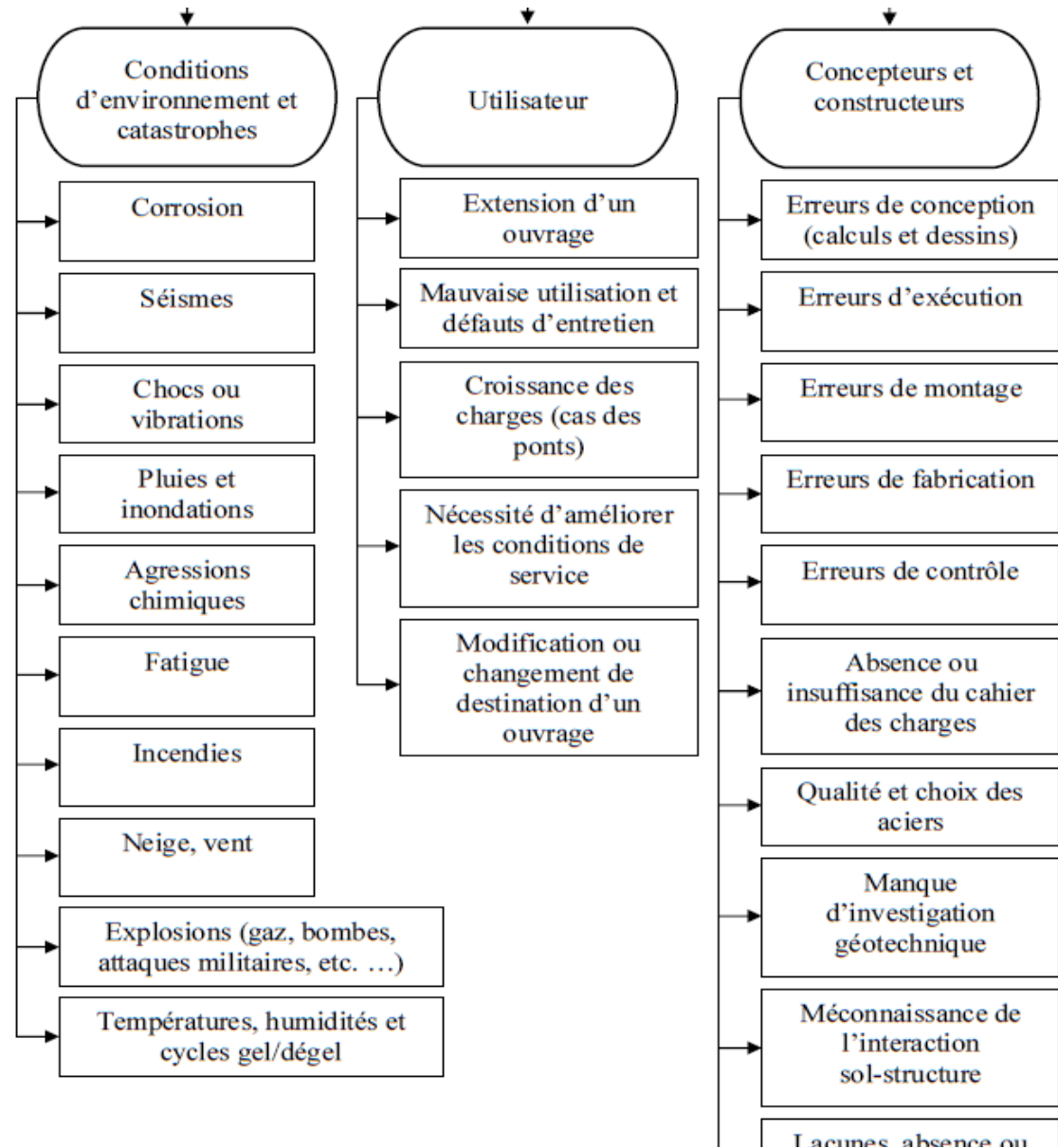


Figure I.1 : Schématisation des désordres en trois groupes de famille

I.3 Méthodes et techniques de renforcement

Le choix de la méthode de réparation et des matériaux à mettre en œuvre est défini en fonction de la nature et de l'importance des désordres constatés, en tenant compte des critères économiques des matériaux de construction, des conditions de chantier et des contraintes de site. Le principe de renforcement ou de réparation consiste en adjonction de matière dans les zones où les sections sont trop sollicitées. Une section devient trop

sollicitée si, du fait même des dispositions adoptées ou du changement des conditions d'exploitations, les efforts appliqués y sont supérieurs à ceux pris en compte lors des calculs (problème de renforcement), ou bien si la résistance a diminué par suite de dégradations (problème de réparation).

Il est possible de définir la maintenance comme l'ensemble des interventions qui ont pour but de prolonger la durée pendant laquelle l'ouvrage va procurer des avantages à la collectivité [14].

Parmi les interventions de maintenance, on peut distinguer :

- les interventions d'entretien à caractère préventif visant à maintenir l'ouvrage à l'état neuf ;
- les interventions de réparation et/ou de renforcement visant à améliorer l'état de l'ouvrage lorsque le processus de dégradation a déjà commencé

Selon les cas étudiés, il est nécessaire de faire intervenir :

- la notion de protection de l'ouvrage visant à assurer par exemple des fonctions d'étanchéité ou à limiter les phénomènes de corrosion ;
- la notion de réparation visant à restituer les caractéristiques initiales de portance (rigidité – résistance) ;
- et éventuellement, la notion de renforcement ayant pour objectif d'améliorer les performances de la structures vis-à-vis de conditions d'exploitation modifiées, ou d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage.

Différentes méthodes et techniques de renforcement des ouvrages sont couramment utilisées depuis de nombreuses années.

I.3.1 Méthodes de réparation non structurales

On peut envisager des solutions de réparation graduelles. Des méthodes non structurales sont utilisées lorsque les désordres sont peu importants. Ces techniques de réparation dites « légères » consistent en une reprise du béton dégradé par ragréage ou injection.

On peut traiter le béton en lui faisant des opérations de ragréage par application de couches de peinture ou de mortier hydraulique ou polymérique, après traitement de la poutre dégradée.

La réparation par injection dans les fissures se fait bien évidemment à l'aide de produits aux caractéristiques bien définies et contrôlées, les conditions de mise en œuvre des produits de ragréage sont précisées dans la norme NF P 95-101.

I.3.2 Méthodes de réparation et/ou renforcement structurales

Pour les ouvrages en béton armé, ces méthodes consistent à ajouter des forces [15] ou de la matière aux éléments détériorés.

Parmi celles consistant à ajouter des forces, on distingue :

- la réparation par adjonction d'armatures complémentaires ;
- la réparation par précontrainte additionnelle ;
- le renforcement par collage de plaques métalliques ;
- le renforcement par collage de plaques composites.

Et celle consistant à ajouter de la matière est la réparation par béton projeté.

I.4 Les différents schémas de renforcement d'une poutre métallique en I

Les matériaux composites utilisés en génie civil pour le renforcement des structures sont essentiellement des composites carbone-époxyde ou verre-époxyde. Cela est dû à leurs performances mécaniques spécifiques supérieures à celles de l'acier, principalement en ce qui concerne la résistance à la traction et à la compression [16].

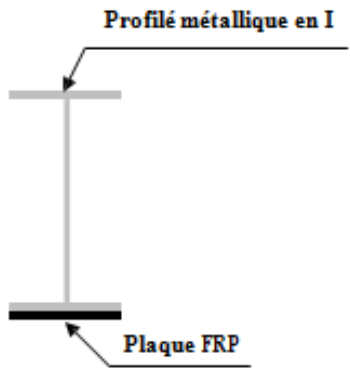
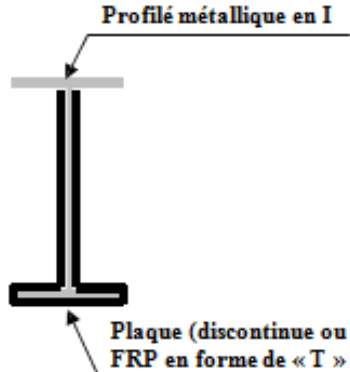
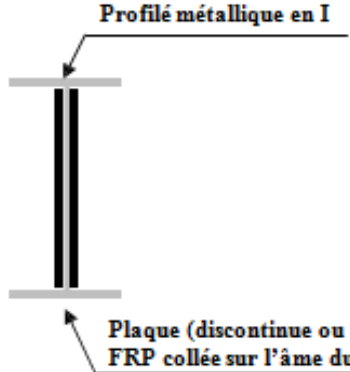
Ils se présentent généralement sous la forme de tissus ou de plaques stratifiées. Aujourd'hui, plus de vingt ans après leur première apparition, la recherche s'y affère et s'intensifie, et on assiste à une grande diversification de leur utilisation dans le domaine du génie civil.

Le tableau I.1 ci-après, présente les différents schémas de collage de matériaux composites sur une poutre métallique en I travaillant en flexion, chaque schéma est prévu pour un objectif particulier (flexion et/ou cisaillement) [17].

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

L'ajout de matériaux composites comme renforcement des poutres métalliques produit de nouveaux modes de rupture [18] qui peuvent se situer à différents niveaux de la poutre métallique, du composite ou de l'interface (adhésif)acier-composite.

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

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

Les principaux modes de rupture susceptibles d'être observés dans les poutres métalliques renforcées extérieurement par des plaques en matériaux composites et travaillant en flexion, sont décrits ci-après.

I.5.1 Rupture due à la traction de la poutre métallique ou du composite

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

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

Dans le cas des poutres métalliques à rupture ductile (fer puddlé, acier), le renforcement par matériau composite a pour fonction de réduire les contraintes dans la poutre métallique sous les charges de service (afin d'augmenter la résistance à la fatigue), aussi bien que l'augmentation de la capacité portante ultime de la poutre renforcée. La rupture classique de la poutre métallique dans la zone tendue en sous face et la rupture fragile en tension de la plaque de composite sont représentées par les figures I.2 et I.3.

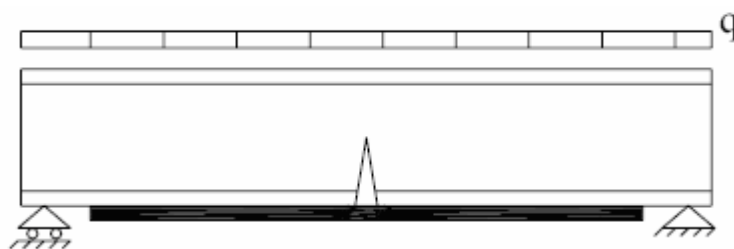


Figure I.2 : Rupture en tension de la poutre en I

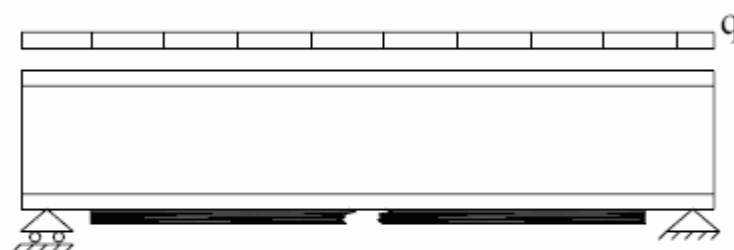


Figure I.3 : Rupture en tension de la plaque composite

I.5.2 Rupture due à la compression de la poutre métallique

Cette rupture, due à la compression de la poutre métallique, se produit avec différents modes selon le type du matériau de substrat et de la géométrie de la section. Quelques métaux,

comme le fer de fonte sont caractérisés par la non-linéarité en traction, avec une réduction progressive de la rigidité, contrairement à l'acier.

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

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

La rupture en compression de la poutre métallique (instabilité locale) est représentée par la figure I.4.

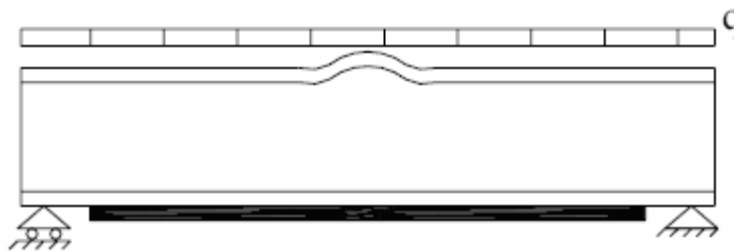


Figure I.4 :Instabilité locale par rupture en compression de la poutre en I

I.5.3 Rupture due au décollement de la plaque composite de renforcement

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

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

La rupture par décollement ou délaminage à l'interface entre la poutre métallique et la plaque composite au niveau des extrémités est représentée par la figure I.5.

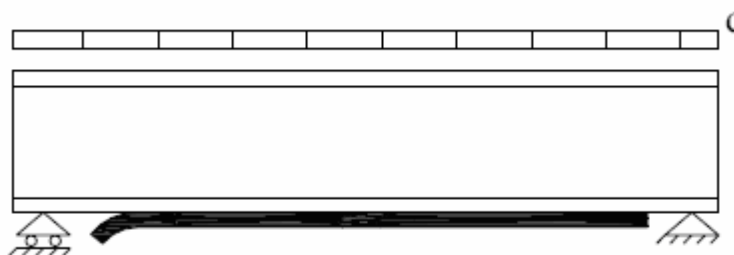


Figure I.5 : Décollement de la plaque

I.5.4 Rupture due au cisaillement aux extrémités de la poutre métallique en I

Le renforcement en flexion impliquant une augmentation des charges verticales agissantes, il est nécessaire de vérifier la poutre contre le cisaillement et la rupture par instabilité locale proche des appuis.

La rupture en cisaillement par instabilité locale de la poutre métallique est représentée par la figure I.6.

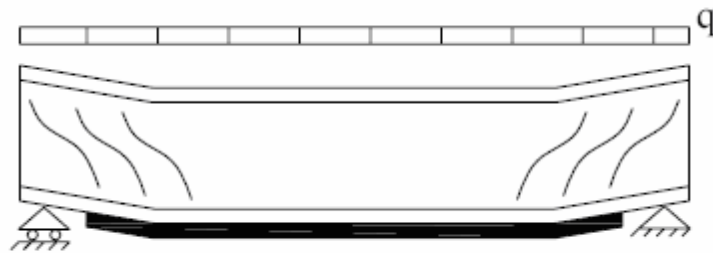


Figure I.6: Rupture en cisaillement

I.6 Conclusion

Comme cela a été montré précédemment le béton se dégrade sous l'action de nombreux facteurs. Compte tenu du coût des structures de génie civil, il est souhaitable de pouvoir les renforcer ; au lieu de les démolir et reconstruire ; afin d'augmenter leur durée de vie.

Les opérations de maintenance des ouvrages consistent à :

- les protéger en limitant leur corrosion et en leur assurant de meilleures conditions d'étanchéité ;
- les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance ;
- les renforcer en améliorant leurs performances et leur durabilité.

Les matériaux composites présentent des avantages indéniables tels que :

- Grande rigidité ;
- Grande résistance ;
- Faible poids ;
- Résistance à la corrosion ;
- Durabilité vis-à-vis des agressions chimiques ;
- Neutralité électromagnétique ;

- Aptitudes au formage et au moulage.

Ces qualités justifient donc pleinement, leur utilisation pour le renforcement et/ou réparation des ouvrages de génie civil.

En plus de cela, une documentation de plus en plus riche et abondante sur leur utilisation pour des applications de génie civil, est disponible.

Au vu de cette documentation, plusieurs conclusions peuvent être tirées concernant le renforcement des poutres métalliques en utilisant des matériaux composites. En effet, cette revue des principales recherches effectuées dans ce domaine nous donne plusieurs indications quant aux possibilités d'utilisation des composites.

Des applications pratiques ont été réalisées en grand nombre, principalement en Europe.

En Amérique du Nord, l'utilisation des composites connaît une croissance remarquée en génie civil, principalement dans le domaine de la réhabilitation des structures.

Des essais ont été réalisés en laboratoire par un grand nombre de chercheurs, confirmant que les éléments structuraux renforcés avec des matériaux composites peuvent supporter des augmentations de charges considérables.

Une augmentation de résistance à la flexion peut être obtenue en collant des matériaux composites sur la face tendue des poutres métalliques. De nouveaux modes de rupture spécifiques aux poutres renforcées par matériaux composites doivent être pris en considération lors du dimensionnement. On doit notamment prévoir une possibilité de délaminage entre l'acier et les composites en installant des ancrages.

Chapitre II

Généralités sur les matériaux composites

II.1 Introduction

La majorité bâties du milieu du vingtième siècle sont désuètes et atteignent un stade critique en dévoilant des détériorations superficielles si ce n'est des faiblesses structurelles plus profondes. Dans la plupart des cas, l'introduction de résines organiques dans les fissures ou le renforcement des structures par collage de renforts externes rigides permettent de prolonger la durée de service des ouvrages. La technique de renforcement par collage de plaques métalliques, développée dans les années 60, est remplacée depuis le début des années 90 par une méthode de renforcement par composites à base de diverses fibres, dont la mise en œuvre est allégée en terme d'infrastructures de chantier et de préparation de surface.

Un matériau composite est la combinaison macroscopique de deux ou plusieurs matériaux complémentaires ayant des caractéristiques différentes, dont l'ensemble donne un matériau hétérogène et anisotrope. La performance de l'ensemble est supérieure à celle des éléments constitutifs pris séparément.

Depuis leurs premières applications en génie civil, l'intérêt des composites s'est généralisé sur l'ensemble de la communauté internationale, groupes industriels et laboratoires de recherches, et s'est particulièrement accentué ces dernières années si l'on juge par l'importance du nombre de publications, de congrès et de colloques internationaux qui traitent quotidiennement de ce sujet et ce afin de mieux comprendre et cerner les problèmes posés par cette nouvelle technique. Les références [7,20-24] sont des exemples d'études réalisées récemment en France dans ce domaine.

Nonobstant les nombreux avantages que fournissent les matériaux composites, leurs adaptations aux applications de renforcement révèlent de nombreuses difficultés liées directement à la mécanique des composites (matériaux hétérogènes et anisotropes) qui restent toujours sujets à la recherche, car liés à la structure renforcée (décollement, durabilité, etc.).

Le but de ce chapitre est au préalable de présenter les éléments constituant le composite afin de cerner avec exactitude leur ingénierie tant au niveau du composite lui-même qu'au niveau de la structure renforcée, de donner par la suite quelques procédés de fabrication et de mise en œuvre et enfin d'énumérer les propriétés des matériaux composites.

II.2 Description des constituants élémentaires des composites

On désigne par matériaux composites des arrangements de fibres, continues ou non, d'un matériau résistant, appelé renfort, qui sont noyées dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible[25]. La matrice conserve la disposition géométrique des fibres et leur transmet les sollicitations auxquelles est soumise la pièce. Les produits ainsi obtenus présentent des propriétés mécaniques proches de celles des fibres et garantissent une résistance chimique similaire à celle de la matrice comme le montre la figure II.1.

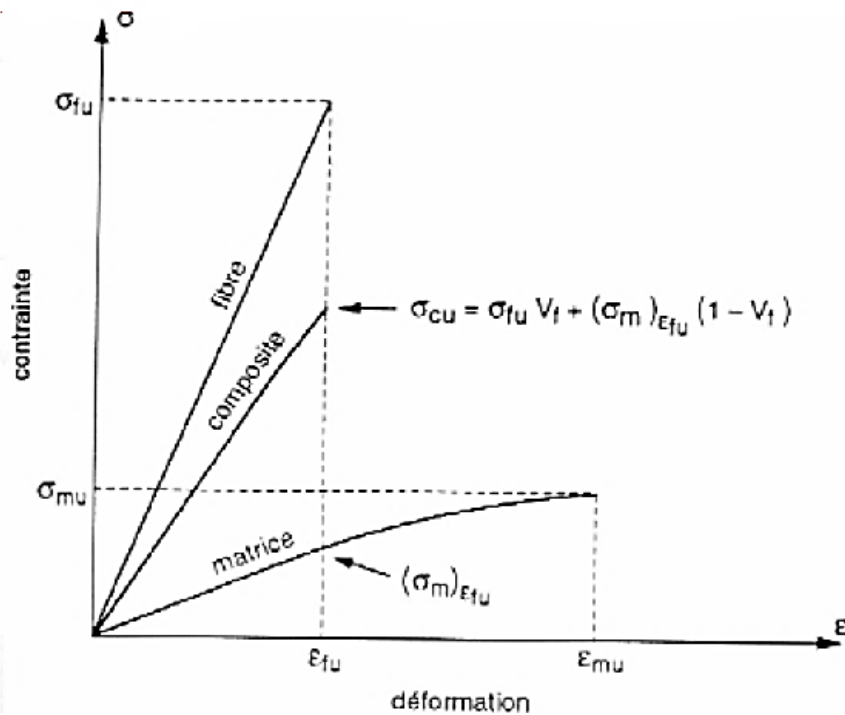


Figure II.1 : Relation contrainte-déformation en traction pour un composite et ses différents composants

Les matériaux composites structuraux sont principalement constitués de deux phases :

- Le renfort assurant la fonction mécanique, se présente généralement sous la forme de fibres dont l'orientation au sein du composite dépend de la sollicitation mécanique supportée par la pièce renforcée ;
- La matrice réalisant la liaison entre les renforts tout en assurant leur protection vis-à-vis des agents agressifs et prévenant ainsi toute rupture catastrophique.

Généralement, les matériaux composites structuraux, de par la nature du renfort, sont fortement anisotropes, c'est-à-dire que leurs propriétés sont très différentes suivant la direction considérée.

Par ailleurs, les matériaux composites sont légers, c'est-à-dire que les masses volumiques de leurs constituants sont de l'ordre de 1 à 3.5 g/cm³.

II.2.1 Les fibres de renfort

Les fibres sont composées de plusieurs filaments élémentaires dont les diamètres varient de 5 à 25 μ. Les lois de comportement des fibres sont de type fragile.

Dans le domaine du génie civil, les principales fibres utilisées sont les fibres de Carbone, de Kevlar et de Verre.

II.2.1.1 Les fibres de Carbone

Suivant les conditions de leur fabrication, il existe toute une variété de fibres de carbone.

Actuellement trois sortes sont commercialisées :

- Les fibres à haute résistance classique (types : As4, As6, T300 et X635) ;
- Les fibres à haute résistance module intermédiaire (types : IM6, X636) ;
- Les fibres à haut module (types : M40 et HM5).

D'un fabricant à l'autre, les propriétés mécaniques varient suivant les propriétés physiques et mécaniques moyennes. Elles sont données dans le tableau II.1 :

Tableau II.1: Propriétés des fibres de carbone

Propriétés en traction	HR		IM	HM	
	R_t (MPa)	3 000 à 5 000	4 000 à 4 500	47 000 à 52 000	2 000 à 2 500
E_{oT} (MPa)	220 000 à 240 000	235 000 à 250 000	275 000 à 300 000	350 000 à 400 000	450 000 à 500 000
A_R (%)	1,2 à 1,5	1,6 à 1,8	1,4 à 1,6	0,5 à 0,7	0,3 à 0,5
Masse volumique (g/cm ³)	1,75 à 1,80	1,75 à 1,80	1,70 à 1,80	1,80 à 1,85	1,90 à 1,95

Où R_t : Résistance à la rupture ;

E_{oT} : Module de Young ;

A_R : L'allongement à la rupture.

Une particularité importante de ces fibres est leur coefficient de dilatation thermique négatif ou quasi nul dans le sens de la fibre, c'est-à-dire que les fibres se raccourcissent quand on les chauffe et s'allongent quand on les refroidit.

II.2.1.2 Les fibres de Kevlar

Les fibres de Kevlar sont des fibres synthétiques à base de polyamide aromatique (les aramides). Actuellement, il existe deux types de ces produits :

- Les fibres de Kevlar 49 ;
- Les fibres de Kevlar 29.

Les premiers sont principalement utilisés pour la confection des composites, alors que les autres entrent surtout dans la constitution des cordes, des cordages et des câbles.

Les propriétés physiques et mécaniques de ces deux types de fibres sont représentées dans le tableau II.2 :

Tableau II.2: Propriétés des fibres de Kevlar

Propriétés en traction	Kevlar 49	Kevlar 29
R_r (MPa)	3 000	2 700
E_{oT} (MPa)	120 000 à 130 000	60 000
A_R (%)	2.1	4
Masse volumique (g/cm ³)	1.45	1.44

Où R_r : Résistance à la rupture ;

E_{oT} : Module de Young ;

A_R : L'allongement à la rupture.

De même que pour les fibres de carbone pour la dilatation thermique, les fibres de Kevlar présentent la même particularité dans le sens de fibres.

II.2.1.3 Les fibres de Verre

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

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

Les propriétés de ces fibres sont représentées dans le tableau II.3 ci-dessous :

Tableau II.3: Propriétés des fibres de Verre

Propriétés en traction	Verre E	Verre S	Verre R
R_t (MPa)	3 400	4 900	4 400
E_{oT} (MPa)	73 000	87 000	86 000
A_R (%)	4.9	-----	5.2
Masse volumique (g / cm ³)	2.54	2.54	2.55

Où R_t : Résistance à la rupture ;

E_{oT} : Module de Young ;

A_R : L'allongement à la rupture.

La figure II.2, ci-après, compare la résistance en traction des différentes catégories de fibres utilisées pour les structures en génie civil. Cependant pour le renforcement, les composites à fibres de carbone se sont imposés par leurs caractéristiques mécaniques.

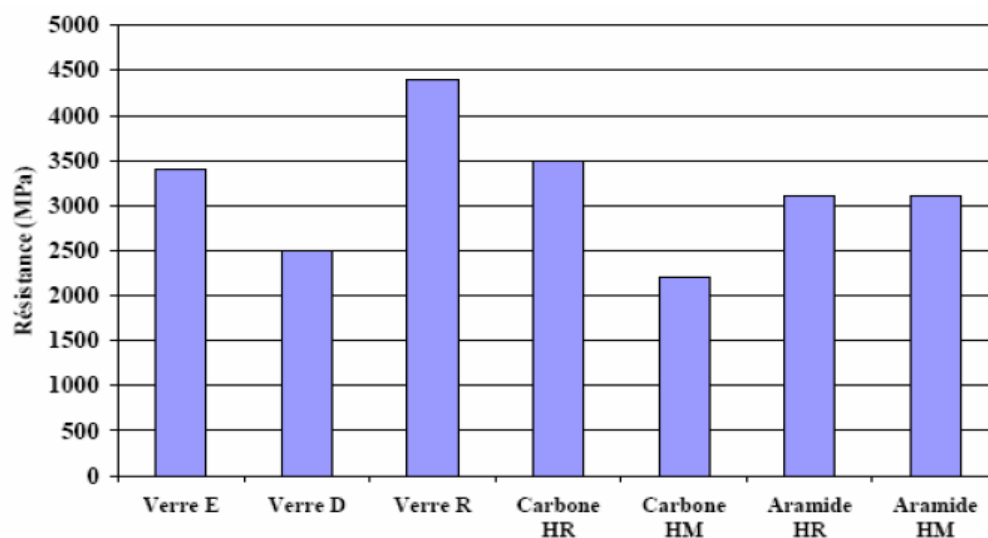


Figure II.2: Histogramme des résistances à la rupture en traction des différentes catégories de fibres

II.2.1.4 Autres types de fibres

D'autres catégories de fibres existent et sont énumérées ci-dessous :

- Les fibres de bore, de haut module, insensibles à l'oxydation à hautes températures et obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène ;
- Les fibres de silice ou de quartz, produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée ;
- Les fibres de polyéthylène, de haut module, présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité.

Pour des structures peu sollicitées, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester.

II.2.2 Les matrices

Les matrices sont des matériaux isotropes et leur utilisation dans les composites permet de coller les fibres entre elles et de leur transférer les efforts de la pièce renforcées. De plus, elles jouent un rôle très important pour résister aux forces transversales, de cisaillement et de compression. Et en plus de cela, elles protègent les fibres en les isolant de l'humidité, de l'oxydation et des agressions chimiques. Actuellement, on distingue deux catégories de matrices :

- Les matrices organiques (résines synthétiques) ;
- Les matrices minérales.

II.2.2.1 Les matrices organiques

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

II.2.2.1.1 Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables sont les plus employées comme matrice des matériaux composites structuraux. Comme leur nom le laisse entendre, ces produits durcissent après un cycle de chauffage appelé « cycle de polymérisation ». A l'issue de celui-ci, le matériau est un solide relativement rigide qui ne fond pas, ni même se ramollit sous l'effet de la température.

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

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

Le tableau II.4 ci-après, présente les propriétés physiques et mécaniques de ces résines après polymérisation.

Tableau II.4: Propriétés des Résines thermodurcissables

Propriétés en traction	Polyester	Epoxyde	Polyamide	Phénolique	Silicone
$E_{\sigma T}$ (MPa)	30 à 90	30 à 100	Environ 90	20 à 60	20 à 60
A_R (%)	2 000 à 3 000	2 500 à 4 000	Environ 3 000	1 000 à 5 000	Environ 3 000
Densité (g/cm ³)	1.1 à 1.3	1.1 à 1.3	Environ 1.3	1.2 à 1.4	1.0 à 1.1

Où $E_{\sigma T}$: est le module de Young ;

A_R : est l'allongement à la rupture.

II.2.2.1.2 Résines thermoplastiques

Contrairement aux résines thermodurcissables, une fois chauffées, les résines thermoplastiques deviennent facilement déformables. Lorsqu'on les soumet à des gradients de température, elles commencent par se ramollir puis elles fondent.

De ce fait, leur utilisation en température est limitée bien que leur mise en œuvre est amplement aisée.

Les variétés qui pourraient être appliquées sont : les poly sulfones, les polyarylsulfones, les polycarbonates et le nylon polyester thermoplastique.

II.2.2.2 Les matrices minérales

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

II.2.3. Les charges et les additifs

Différents produits peuvent être incorporés à la résine pour lui conférer des caractéristiques particulières. Les quantités de produits peuvent varier de quelques dizaines de pourcentage dans le cas de charges à quelques pourcentages et moins encore dans le cas d'additifs.

Les propriétés particulières qui peuvent généralement être améliorées portent sur les résistances mécaniques telles que celle à la compression et les propriétés de mise en œuvre. Nous pouvons ainsi citer en exemple les charges renforçantes qui se présentent sous forme sphérique (microbilles de verres) ou non sphérique (écailles de mica), les charges non renforçantes qui ont pour rôle de diminuer le coût de la résine et de contribuer ainsi à l'augmentation de certaines propriétés telles que la masse volumique, la dureté et le module d'élasticité.

Les additifs quant à eux, interviennent comme lubrifiants, colorants ou agents anti-ultraviolets.

II.2.4. Les adhésifs

Les adhésifs utilisés en génie civil sont appelés « des colles structurales », c'est à dire qu'ils sont capables de conférer à un assemblage une résistance équivalente à celle des matériaux qui le constituent, tout en assurant le transfert des contraintes entre les deux substrats.

Aujourd'hui, grâce aux progrès réalisés dans la formulation des produits organiques de synthèse, le collage est reconnu comme une technique d'assemblage incontournable dans des secteurs d'activités aussi variés que l'aéronautique, le bâtiment et les travaux publics et pouvant donc remplacer les techniques aussi diverses que le boulonnage, le rivetage et le soudage. Le collage se présente donc comme une opportunité pour le génie civil. En effet Malek et al[41] ont testé quatre colles époxy différentes et ont conclu que l'adhésif devait présenter une rigidité et une résistance suffisantes pour assurer la transmission des efforts entre le composite et le béton. Chaque méthode d'assemblage comporte des avantages et des inconvénients, mais le collage offre des avantages indéniables, dont un gain de masse, la possibilité d'assembler des matériaux différents, une meilleure répartition des contraintes, l'absence de corrosion, assemblages peu visibles, meilleur rapport résistance mécanique/poids.

Dans le cas de réparation d'une structure métallique par matériaux composite, un adhésif est nécessaire pour coller le matériau composite sur une surface de l'acier, dont l'objectif est de transmettre les contraintes entre l'acier et le composite. D'après le bulletin 14 de la FIB, les

caractéristiques typiques d'un adhésif époxy [26] avec une cure à froid sont énumérées dans le tableau II.5 :

Tableau II.5: Caractéristiques typiques de l'adhésif d'époxy

Densité (kg/m ³)	1 100 – 1 700
Module de Young (GPa)	0.50 - 20
Module de cisaillement (GPa)	0.80 - 8
Coefficient de Poisson	0.30 – 0.40
Résistance en traction (MPa)	9 - 30
Résistance à l'effort tranchant (MPa)	10 - 30
Résistance en compression (MPa)	55 - 110
Déformation en traction à la rupture (%)	0.50 - 5
Température de transition vitreuse (°C)	45 - 80

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

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

Dans les deux premières catégories, on trouve les grandes familles de résines utilisées en génie civil : les époxydes, les polyuréthanes, les composés acryliques et les polyamides.

Le collage peut constituer une solution très performante dans beaucoup de domaines industriels, mais cela impose des connaissances de base et nécessite beaucoup d'attention et de maîtrise lors de la mise en œuvre. Plusieurs paramètres entrent en jeu pour la réussite d'un bon collage comme les conditions de mise en œuvre, la nature, l'épaisseur du joint d'adhésif et l'état des substrats. Ces derniers doivent subir un traitement de surface adéquat qui leur offre une adhésion optimale. Plusieurs travaux [27-29] ont montré le rôle important que peut jouer le traitement de surface dans la résistance d'un assemblage collé.

De nombreuses méthodes de préparation de surface sont disponibles (traitements chimiques, mécaniques, électrochimiques, plasmas, etc...). Compte tenu des contraintes particulières du Génie Civil dont les dimensions des pièces et la nature des matériaux, les traitements les plus utilisés sont les traitements mécaniques tels que le sablage et l'abrasion par ponçage. Les traitements chimiques comme le dégraissage aux solvants, le dégraissage par saponification, le dégraissage par émulsification et le décapage chimique sont quant à eux utilisés dans le cas des métaux.

D'une manière générale, le traitement de surface doit être choisi en fonction des substrats à encoller et de l'adhésif à mettre en œuvre, mais également en fonction des contraintes du chantier.

II.3. Procédés de fabrication et de mise en œuvre

Le mélange renfort-résine ne devient un véritable matériau composite résistant qu'au terme de la dernière phase de fabrication consistant au durcissement de la matrice. Dans le cas des composites à matrice résineuse, cette dernière doit être polymérisée. Le choix du procédé de mise en œuvre est dicté à la fois par la nature du matériau, la forme de la pièce à renforcer, les performances visées et les impératifs de production telles la quantité attendue et la cadence de d'exécution. Toute mise en œuvre de matériaux composite sur une structure endommagée nécessite d'abord un ragréage de la surface à réparer. Celle-ci doit être plane et nettoyée. Dans la majorité des cas, une injection de fissure et un traitement de surface par sablage sont réalisés. Le secteur du bâtiment utilise principalement trois procédés de mise en œuvre.

II.3.1. Stratification directe de tissu sec (fabrication in-situ)

Comme la plupart des fibres longues, les fibres de carbone permettent de fabriquer des tissus de différentes formes et tailles. Ces tissus sont obtenus par assemblage de fils entre eux pour créer une armure. Cette armure permet d'obtenir un matériau unidirectionnel ou bidirectionnel selon l'orientation des fils. Le renforcement de structures à partir d'un tissu sec se fait directement par la pose de ce dernier sur une couche de résine qui recouvre l'élément à renforcer et qui sert de liant. Après marouflage, une couche de résine de fermeture permet de parfaire l'imprégnation. Les pressions nécessaires appliquées pour cette méthode de renforcement sont faibles par rapport à d'autres méthodes de renforcement. Le principal avantage du renforcement par tissus secs est la manipulation très facile sur chantier

avec une absence totale de matériel lourd à déplacer. Cette technique permet notamment un suivi parfait de la forme du support ainsi que la maîtrise de l'épaisseur du film de résine.

En utilisant des polymères polymérisant à température ambiante, il est possible de réaliser une stratification directe, en respectant les étapes suivantes :

- Préparation de la surface, application de la couche primaire ;
- Application d'une première couche de polymère époxyde ;
- Application d'une première couche de tissu sec ;
- Application d'une seconde couche de polymère époxyde ;
- Protection et finition.

Ce procédé présente l'avantage d'une mise en œuvre simplifiée, mais le renforcement acquiert toute sa résistance au bout d'une semaine et le contrôle de la qualité de l'application doit être soigné suivant les conditions de mise en œuvre. Ce procédé a trouvé de nombreuses applications en Europe, au Japon et aux Etats-Unis comme le montre la figure II.3.

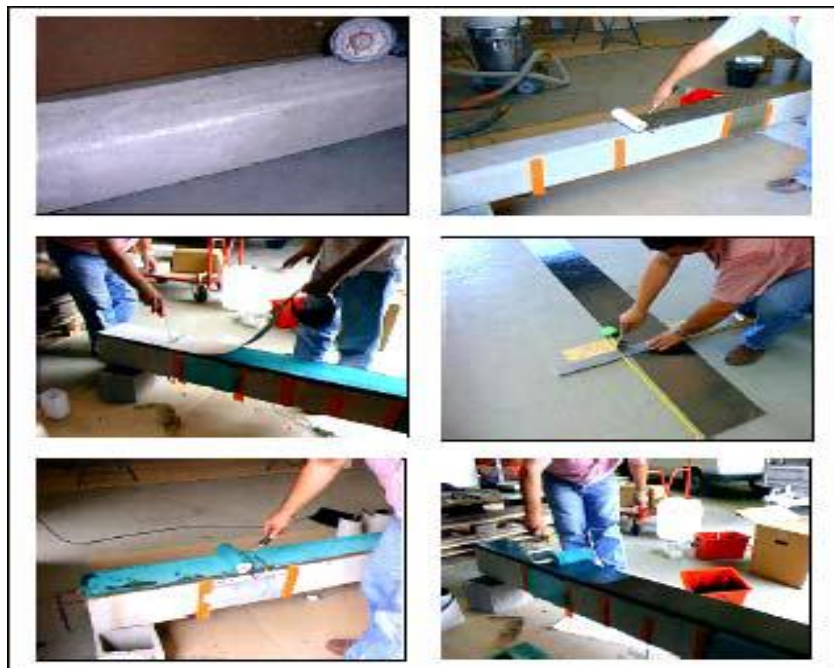


Figure II.3 : Mise en œuvre par stratification directe

II.3.2 Collage de plaques composites (système préfabriqué)

Les plaques composites sont obtenues à partir de fibres continues qui sont enduites par passage en continu dans un bain de résine[30]. Ces résines peuvent être de type époxyde, polyester, vinylester ou phénolique. L'ensemble des mèches pré-impregnées passe ensuite dans une filière où l'excès de résine est éliminé, puis dans un four de polymérisation. Les

produits finis se présentent sous forme de bandes ou joncs, plus au moins rigides suivant les épaisseurs et les diamètres. La section des bandes les plus courantes est 100 x 1 mm, leur

longueur, suivant la demande, varie de quelques centimètres à plusieurs centaines de mètres.

A partir de ces bandes, la technique de renforcement est similaire à celle du plat métallique collé selon le procédé L'Hermitte.

Comparée avec la technique utilisant l'acier, cette technique de renforcement permet de travailler avec des produits légers (1/5 de la densité de l'acier), elle a aussi l'avantage de nécessiter une pression de collage limitée et élimine les phénomènes d'oxydation. La figure II.4 illustre le procédé de collage composé des étapes suivantes :



Figure II.4 : Procédé par collage de plaques d'après Sika Carbodur

- Nettoyage de la face de collage de la plaque ;
- Traitement de surface à réparer par sablage ;
- Traitement par eau sous pression et meulage ;
- Nettoyage de la surface par dépoussiérage ;
- Application du polymère époxy sur la plaque de composite ;
- Pression de la plaque sur sa surface pour enlever l'excédent de colle ;

- Pression jusqu'à polymérisation complète du polymère.

Il y'a lieu de noter que la différence entre les tissus et les plaques ou lamelles réside dans le fait que les premiers seront déposés sur site et vont polymériser lors de la mise en œuvre alors que les plaques sont préfabriquées avant.

II.3.3. Enroulement filamentaire

La fibre est produite de manière continue de très grande longueur et est déposée autour d'un mandrin. La longueur de fibres continues peut varier de 600 m à 5 Km. Pour renforcer directement une structure à partir d'une bobine de fibre de carbone, il est nécessaire de pouvoir tourner autour. Ce procédé de renforcement est donc naturellement limité aux colonnes ou aux pylônes comme illustré dans la figure II.5. Le principal avantage de ce procédé est l'automatisation complète du système de pose. Son principal inconvénient est le fait qu'une pose manuelle est nécessaire pour renforcer les extrémités des piles et des colonnes et que cette méthode demande en outre du temps et des manipulations importantes pour installer le matériel.



Figure II.5: Renforcement par fibres filamenteuses, enroulement automatisé

II.4. Influence de l'environnement sur le comportement des composites

II.4.1. Influence de la température

Face à une augmentation de la température, les performances des matériaux composites sont principalement conditionnées par l'adhésif. En revanche, pour une température basse, les performances sont conditionnées par la matrice.

Le point le plus important concernant la température est la température de transition vitreuse T_g . En effet, d'après Hollaway et al [31], les propriétés mécaniques diminuent à l'approche de ce seuil de température comme illustré dans la figure II.6. Pour éviter une rupture issue de l'adoucissement de l'adhésif ou de la résine, la température maximale de service doit être inférieure à T_g .

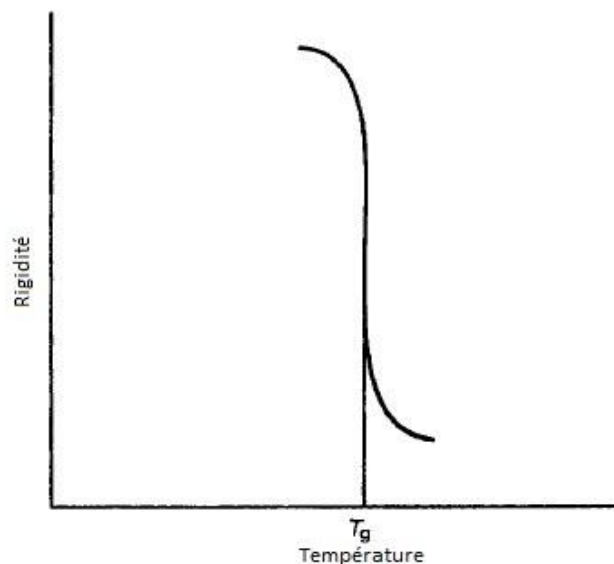


Figure II.6: Température de transition vitreuse d'après Hollaway

La température de transition vitreuse est de l'ordre de 30°C à 80°C pour l'époxy polymérisant à froid. Suivant les conditions de mise en œuvre et la nature du durcisseur, la température de transition vitreuse peut atteindre 170°C pour un système renforcé et recuit. La polymérisation à température ambiante est lente. T_g peut varier en fonction de l'environnement (température, humidité, etc.). Une température élevée pourrait réagir comme une postcure sur la résine et donc augmenter T_g . En revanche, l'absorption d'humidité par les résines va conduire à une diminution de T_g . Pour une structure sensée résister à une température élevée (mais inférieure à T_g), deux choix sont possibles : utiliser soit une résine avec une cure en froid mais ayant une haute température de transition

vitreuse T_g initiale, soit une résine ayant une température de transition vitreuse T_g améliorée après une postcure.

En cas d'incendie, le renforcement par collage extérieur de matériaux composite doit être protégé par une technique d'isolation.

II.4.2 Influence de l'humidité

La résine de la matrice absorbe l'eau. La quantité d'eau absorbée dépend du type de résine et de la température de l'eau. Les deux conséquences immédiates en sont la réduction de la température de transition vitreuse et l'adoucissement de la résine. Dans le cas d'une résine époxy, ces deux phénomènes sont partiellement réversibles lors du séchage. L'absorption maximale d'eau par une résine époxy est environ de 3% en poids.

L'influence de la combinaison de la température et de l'humidité sur les caractéristiques mécaniques d'une résine époxy polymérisée à froid est illustrée sur la figure II.7 d'après Hollaway et al [31]. Néanmoins, il y a une grande différence entre les conditions de laboratoire où les éprouvettes de résines sont saturées d'eau, et les conditions réelles de température et d'humidité auxquelles sont soumis les matériaux composites en place sur des éléments de structures réelles : la prise d'eau potentielle sera plus faible et les conséquences sur le comportement réduites.

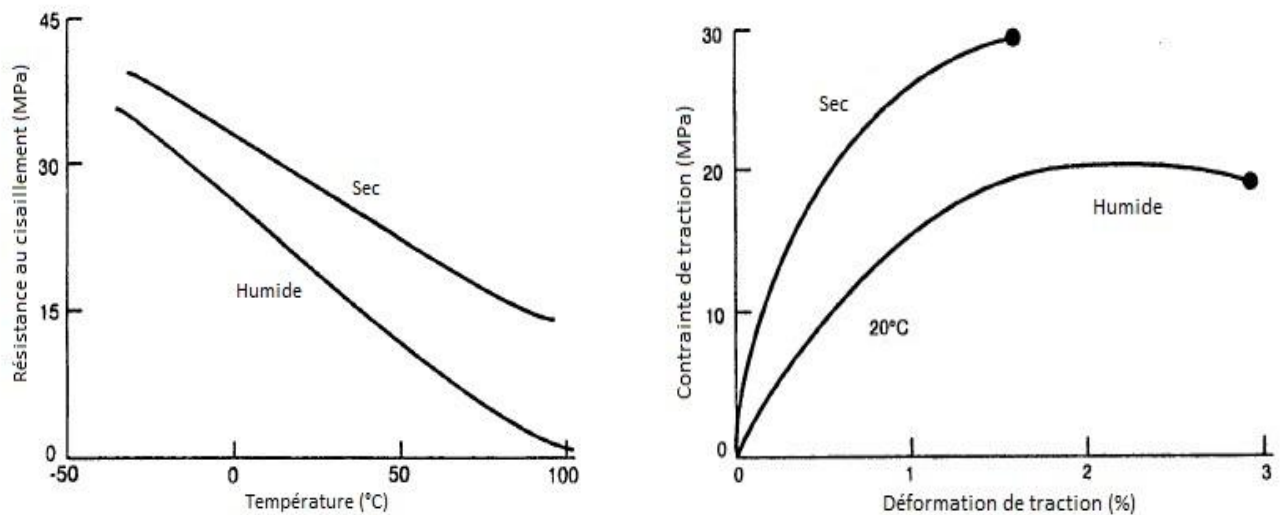


Figure II.7 : Influence de la température et de l'humidité sur les caractéristiques mécaniques d'une résine époxy d'après Hollaway

II.4.3. Influence des ultraviolets

Les ultraviolets peuvent produire une réduction de la transmissibilité des rayons lumineux : la couleur du composite peut changer. Ce changement de couleur ou décoloration est dû à l'influence des rayons ultraviolets sur la résine de la matrice, et n'implique aucune dégradation structurale ou physique. Les fibres de carbone ne sont pas affectées par les rayons ultraviolets.

Les caractéristiques mécaniques des matériaux composites ne sont donc que très légèrement influencées par les rayons ultraviolets.

II.4.4. Influence du fluage et de la corrosion sous contrainte

Le fluage des composites à fibres de carbone n'est pas un facteur déterminant pour le dimensionnement du renforcement d'éléments structuraux, car les structures renforcées ont généralement déjà subi leur propre fluage.

L'atmosphère ou l'environnement ambiant en est général insuffisant pour causer une corrosion du composite.

Néanmoins, il peut y avoir corrosion lorsque le composite est soumis à un certain niveau de contrainte : c'est la corrosion sous contrainte. Ce phénomène est dépendant du temps, du niveau de contrainte, du type de matrice et de fibres. Les fibres de carbone n'en sont que très légèrement affectées, lorsque le niveau de contrainte reste inférieur à 80 % de la résistance ultime. Les niveaux de sollicitations réels des composites en place sont tels que les risques sont très limités.

II.5. Propriétés des matériaux composites

Dans le domaine de la construction, les matériaux composites présentent de nombreux avantages [31,32] ainsi résumés : Tout d'abord, leur faible masse réduit considérablement le poids propre des structures dans lesquelles ils sont mis en œuvre (les plaques en matériaux composites sont cinq fois plus légères que celles en acier). Ainsi, au lieu de plaque on parle plutôt de lamelle. Cette réduction de masse se traduit par une plus grande facilité lors de la mise en place, et abaisse ainsi le coût de la réparation ;

- Les plaques en matériaux composites, contrairement à l'acier, sont dix fois plus résistantes, d'une faible épaisseur et d'une grande flexibilité ;

- D'après Reyne[33], la figure II.8 nous permet de juger de l'intérêt, en termes de rigidité et de résistance spécifiques couplées, d'utiliser les matériaux composites en substitution à l'acier ;
- Les matériaux composites ne se corrodent pas. Cette propriété peut s'avérer déterminante pour l'application à des ouvrages d'art subissant les effets des intempéries ou des sels de divers glaçage, ainsi qu'en présence de courants vagabond ;
- Ils sont insensibles aux produits chimiques tels que les graisses, les peintures, les solvants et le pétrole. Seuls les décapants de peinture attaquent les résines époxydes ;
- Ces matériaux sont des isolants électriques et sont transparents aux ondes électromagnétiques. Ces avantages permettent de les utiliser dans des réalisations situées en milieu corrosif tel que le bord de mer ou dans une ambiance industrielle de même qu'en milieu électronique ;
- Toutes les sections et longueurs sont disponibles. Les lamelles peuvent être stockées enroulées sur elles-mêmes. Il est également possible d'ajouter pigments ou colorants à la résine et ainsi répondre à des critères d'ordre esthétique.

Néanmoins, ces matériaux présentent quelques faiblesses ainsi résumées :

- Ils sont chers, et c'est leur inconvénient majeur. En effet leur coût de fabrication reste encore élevé, de quatre à vingt fois plus cher, que celui des matériaux traditionnels. Cependant, une partie de cette contrainte économique peut être équilibrée par une réduction du coût de mise en place et de maintenance. En particulier, lors d'une opération à l'aide de composites, le coût de ceux-ci n'est pas un obstacle en comparaison au coût global. Une mise hors service prolongée de l'ouvrage à réparer peut s'avérer bien plus coûteuse ;
- Ils ont une tenue aux impacts et aux chocs très moyenne, inférieure à celle des matériaux métalliques ;
- Leur température d'utilisation est limitée par celle de la matrice plastique. ;
- Ils vieillissent sous l'effet des rayons ultraviolets ;
- Ils ont une tenue au feu réduite. Les fumées émises lors de la combustion de certaines matrices peuvent s'avérer toxiques ;
- La plupart d'entre eux ne sont pas recyclables.
- Ces matériaux vont être appliqués à la face de tension inférieure d'une poutre en acier/béton dans le but de la renforcer, la jonction acier/béton-composite, assurée par une

couche d'adhésif, pose problème vu la concentration des contraintes qui tendent à séparer les deux parties.

- Peu d'expérimentations sont en cours sur le comportement à long terme de ces matériaux. Il semble que la durabilité de ces matériaux est étroitement liée à la durabilité de la matrice plutôt qu'à celle des fibres[6]. Une dégradation de la matrice avec le temps serait rendue possible par des modifications physiques ou chimiques liées à certains types d'environnement.

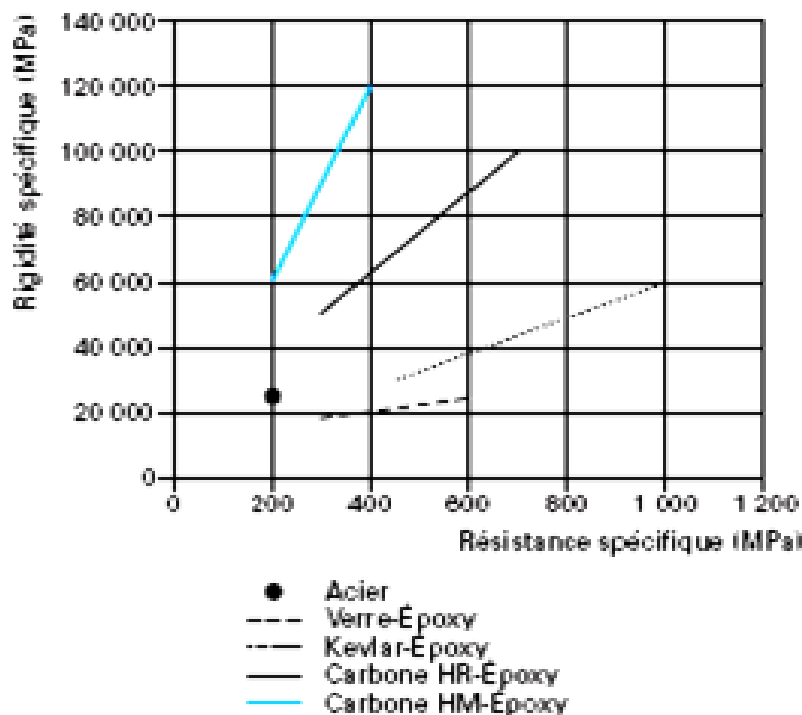


Figure II.8: Propriétés spécifiques de systèmes composites par rapport à l'acier

II.6. Conclusion

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

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

Le plus souvent, les matériaux composites se présentent sous forme d'un empilement de couches donnant lieu à un stratifié ; et comme ce dernier va être appliqué à la face de tension

inférieure d'une poutre dans le but de la renforcer, il est impératif d'étudier la zone de contact poutre-composite appelée interface.

Il est donc important de déterminer un matériau composite adapté à chaque problème rencontré, sélectionner un procédé de mise en œuvre et un adhésif qui garantira l'efficacité de la technique.

Chapitre III

Théorie des plaques stratifiées

III.1. Introduction

Afin de déterminer la réponse mécanique des composites, la théorie de l'élasticité a été adaptée à ces nouveaux matériaux anisotropes et aux structures multicouches, c'est la théorie des plaques stratifiées d'après Berthelot [52].

L'objectif de ce chapitre est de présenter en premier lieu la théorie des plaques stratifiées, qui nous permettra d'exposer le comportement des poutres métalliques renforcées par collage externe d'une ou de plusieurs couches de composites, d'où le terme de stratification. Ensuite il sera introduit l'effet de l'orientation des fibres qui constitue un facteur important agissant sur les contraintes d'interface. Enfin une étude comparative en fonction des angles et du nombre de couche (s) sera présentée afin de déceler leur effet sur la variation des contraintes normales et de cisaillement à l'interface qui fait l'objet de notre étude. Le composite utilisé sera du type CFRP et le chargement uniforme.

III.2 Théorie des plaques stratifiées

La théorie classique des plaques stratifiées, où un stratifié type avec un système de coordonnées locales et globales est représenté dans la figure III.1, est utilisée dans la plupart des modèles décrivant le comportement mécanique d'une structure composite stratifiée. Cette théorie se base sur les hypothèses de Kirchhoff d'après Dhatt[49] qui considère comme nul l'effet de cisaillement transversal.

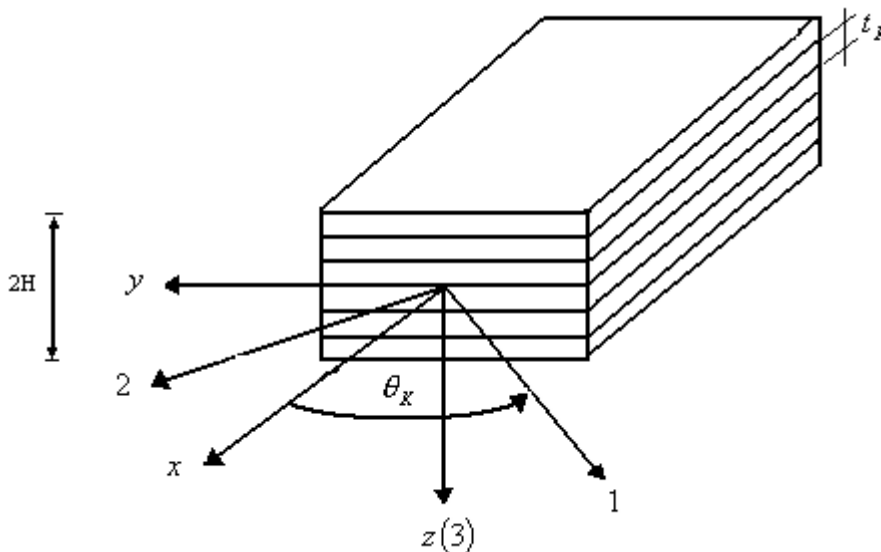


Figure III.1 : Composite stratifié

Ainsi, la réponse d'une plaque stratifiée ne peut être précisément déterminée avec cette méthode que si la structure est très mince et que les matériaux utilisés sont faiblement orthotropes [50]. Ces hypothèses simplifient énormément l'analyse des structures stratifiées.

Ainsi ce chapitre sera consacré au développement des équations qui décrivent la réponse élastique linéaire des composites stratifiés soumis à des charges dans le plan et en flexion.

Les couches individuelles sont supposées être homogènes, orthotropes, ou transversalement isotropes et dans un état de contraintes planes.

III.2.1. Nomenclature d'une structure stratifiée :

Tout d'abord, une structure stratifiée, d'épaisseur T , est constituée de N plis qui sont empilés les uns sur les autres tels que montrés à la figure III.2. Chaque couche est définie par une épaisseur (t_k), une orientation (θ_k).

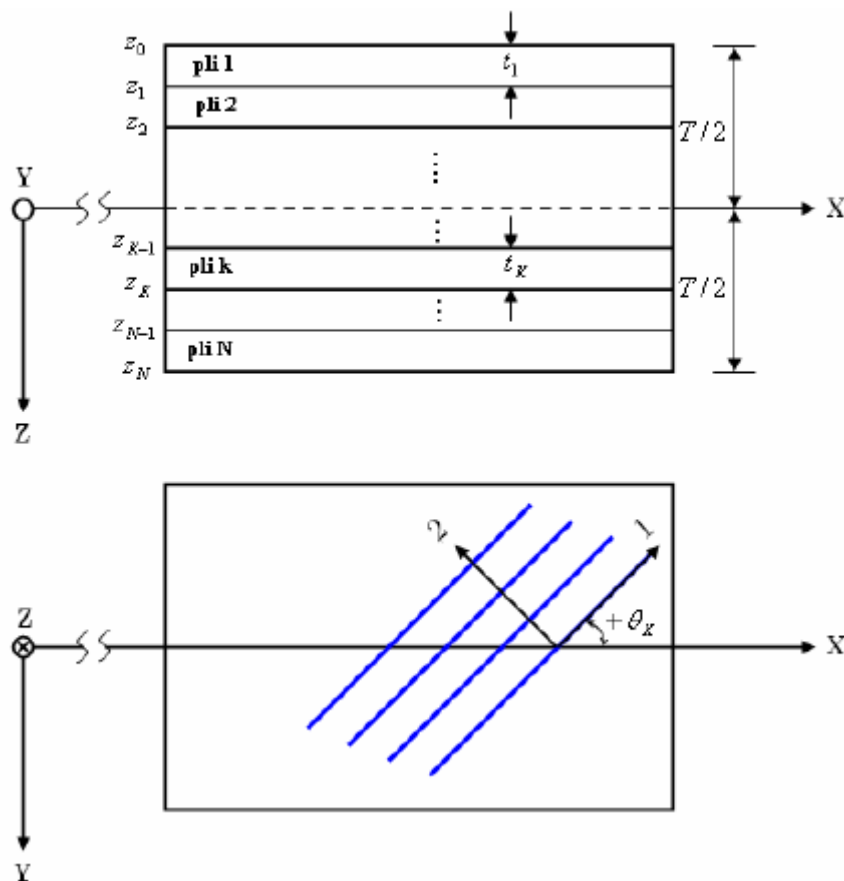


Figure III.2 : Nomenclature d'un stratifié – Orientation d'un pli

L'origine de l'axe z est située au plan moyen de la structure. Le premier pli (pli 1) est situé à l'extrémité supérieure de la structure (à $z = T/2$) tandis que le dernier pli (pli N) est celui situé à l'extrémité inférieure (à $z = -T/2$).

En fait, (1,2) est un repère (local du pli) dans lequel on a déterminé les propriétés. Tel qu'il est montré dans la figure III.2, l'orientation θ_k du pli k est définie par l'angle que fait son repère local (1,2) par rapport au repère global (X,Y) de la structure. Les propriétés globales du stratifié dépendent des propriétés du matériau de chaque pli, de son épaisseur et de l'orientation de celui-ci.

Afin de pouvoir caractériser une structure stratifiée, il faut connaître la séquence d'empilement des plis qui la constitue. C'est-à-dire, il faut déterminer l'orientation de chaque pli et l'ordre dans lequel ils sont empilés.

III.2.2 Définitions et notations décrivant les séquences d'empilement d'un stratifié

Les définitions et notations suivantes sont celles de la plupart des ouvrages et en particulier du document de Weiss et al [51] et Smith et al [42], auxquels sont empruntés les éléments suivants. La séquence d'empilement est décrite à partir de la face du stratifié située à une cote $z < 0$ jusqu'à l'autre face, des crochets « [] » indiquent le début et la fin de l'empilement. Les plis adjacents identiques, de même orientation, représentent une couche, un indice représentant le nombre de plis. Le tableau III.1 montre les notations décrivant les séquences d'empilement d'un stratifié.

- **Stratifié unidirectionnel** : l'orientation des fibres est la même dans tous les plis (l'exemple d'un stratifié unidirectionnel à $\theta = 0^\circ$ dans les différents plis) ;
- **Stratifié à plis orientés $\pm \theta$** : l'orientation des fibres est alternée d'un pli à l'autre, .../ θ / $-\theta$ / $-\theta$ /... avec $\theta \neq 0^\circ$ ou 90° ;
- **Stratifié à plis croisés** : l'orientation des fibres est alternée d'un pli à l'autre, / 0° / 90° / 0° / 90° / ;
- **Stratifié symétrique** : l'orientation des fibres est symétrique par rapport au plan moyen du stratifié, c'est-à-dire que pour chaque pli à angle θ au-dessus du plan médian, il y a un pli à angle égal de l'autre côté du plan médian, $\theta(z) = \theta(-z)$;
- **Stratifié non symétrique** : le matériau est symétrique, l'épaisseur est symétrique, l'orientation est asymétrique, exemple [45/60/-60/-45].

- **Stratifié équilibré** : stratifié comportant autant de couches orientées suivant la direction +q que de couches orientées suivant la direction -q et de même propriété (épaisseur et matériau).
- **Stratifié quasi-isotrope** : le nombre égal de plis orientés à 0, 90, +45 et -45 ou orientés à 0, +60 et -60.

Tableau III.1: Exemples des notations d'un stratifié d'après Smith

Nb Plis	Stratifié	Code	Remarques
6	[0/+45/90/90/+45/0]	[0/45/90] _s	-S : indique la symétrie par rapport au plan médian. -Les plis adjacents sont séparés par / si leurs angles sont différents en valeur absolue.
5	[0/+45/90/+45/0]	[0/45/90] _s	- La barre sur 90 indique que le plan de symétrie passe par le pli d'angle 90°.
7	[0/+45/-45/90/-45/+45/0]	[0/±45/90] _s	- Les plis adjacents + 45° et - 45° sont regroupés comme ± 45°.
14	[0/90/0/0/0/0/45/45/0/0/0/0/90/0]	[0/90/04/45] _s	- Les plis adjacents 0° sont regroupés comme 04.
10	[0B/0B/45C/-45C/90G/90G/-45C/45C/0B/0B]	[0 ₂ B/(±45) _C /90 _G] _s	- Stratifié hybride B : Bore, C : Carbone, G : Glass (Verre)
12	[45/0/90/45/0/90/0/45/90/0/45]	[(45/0/90) ₂] _s ou [45/0/90] _{2s}	- Les séquences d'empilement qui se répètent sont notées entre () complétées d'un indice correspondant au nombre de séquences identiques.
4	[0/90/0/90]	[0/90/0/90]	- Stratifié non symétrique
5	[0/90/45/90/0]	[0/90/ 45] _s	- Stratifié symétrique non équilibré
8	[0/90/+45/-45/-45/+45/90/0]	[0/90/+45/-45] _s	- Stratifié symétrique équilibré

III.2.3. Hypothèses de calcul de la théorie des stratifiés :

Les hypothèses suivantes sont fondamentales pour la théorie des plaques stratifiées :

- L'épaisseur du stratifié est petite comparée à ses autres dimensions d'après Tounsi[44] ;

- Les liaisons inter-laminaires sont parfaites (continuité des déplacements et des déformations) ;
- Toutes les couches sont macroscopiquement homogènes avec des propriétés effectives connues et ont un comportement élastique linéaire (loi de Hooke) ;
- Les propriétés de la couche individuelle peuvent être isotropes, orthotropes ou transversalement isotropes ;
- Chaque couche est dans un état de contrainte plane ;
- Le stratifié se déforme selon les hypothèses de Kirchhoff pour la flexion et la traction des plaques minces :
 - La normale au plan médian reste droite et normale au plan médian déformé après déformation [44](voir la section ABCD dans la figure III.3). Cela est équivalent à négliger les déformations de cisaillement ($\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$) ;
 - Les normales au plan médian ne changent pas de longueur (voir la section ABCD dans Figure III.3). Donc ε_{zz} est négligée ($\varepsilon_{zz} = 0$).

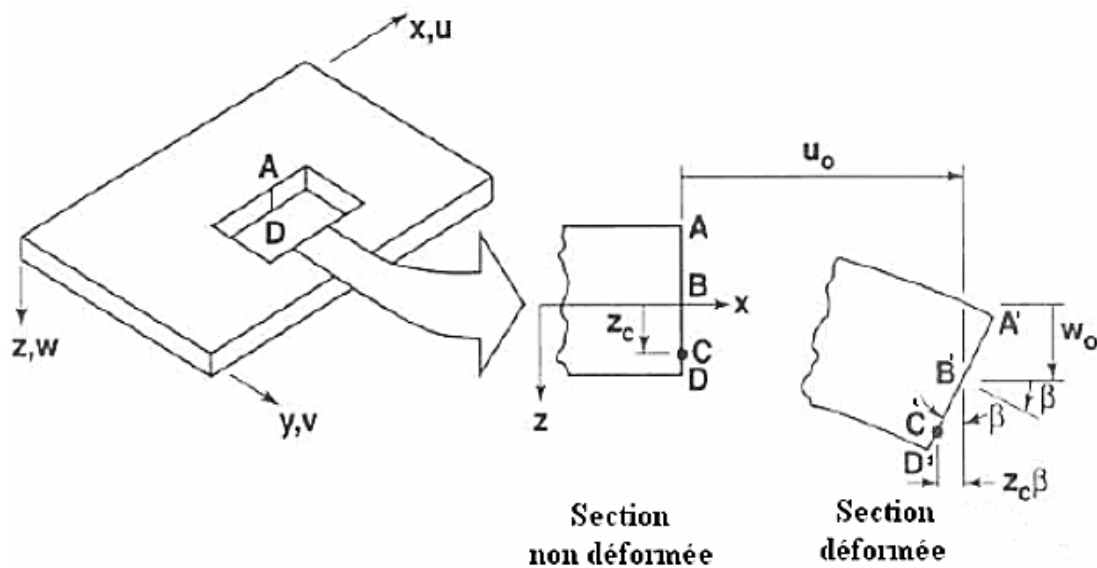


Figure III.3 : Géométrie de déformation d'après Tounsi

III.2.4. Relation déformation–déplacement

Les déplacements sont continus suivant l'épaisseur du stratifié et toute perpendiculaire à la surface reste perpendiculaire après déformation. La figure III.3 ci-dessus, schématise la déformation d'un segment ABCD. Le point B, milieu du segment, se déplace après déformation suivant x de la distance u_0 . Un raisonnement identique pouvant être fait dans la

direction y , il en résulte que le point B, milieu de l'épaisseur se déplace dans l'espace des quantités $u_0 + v_0 + w_0$, respectivement suivant les directions x , y et z .

L'hypothèse de Kirchhoff exige d'une part que :

- Les déformations de cisaillement γ_{zx} et γ_{zy} soient nulles ;
- Le déplacement transversal selon z du plan médian soit une fonction de x et y seulement, c'est-à-dire $w = w(x, y)$.

On suppose que les déplacements sont petits (voir figure III.3), la pente β de la surface déformée sera aussi petite, ce qui implique que :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\partial w}{\partial x} \approx \beta \quad (\text{III.1})$$

Le déplacement total u du point C (voir figure III.3) peut être écrit comme la somme du déplacement du plan moyen u_0 plus le déplacement dû à la rotation β de la normale au plan moyen. Ainsi, on aura :

$$u = u^0 - z \operatorname{tg} \beta = u^0 - z \alpha = u^0 - z \frac{\partial w}{\partial x} \quad (\text{III.2})$$

De la même façon que pour le plan $y - z$, nous aurons :

$$v = v^0 - z \frac{\partial w}{\partial y} \quad (\text{III.3})$$

v^0 : étant le déplacement du plan médium suivant l'axe Y.

Puisque les normales ne changent pas de longueurs, le déplacement transversal w est indépendant de « z » et peut être écrit sous la forme suivante :

$$w(x, y) = w^0(x, y) \quad (\text{III.4})$$

Où l'exposant « 0 » représente le plan médium.

Les équations déformations-déplacements peuvent être écrites comme suit :

$$\left. \begin{aligned}
 \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u^0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \varepsilon_x^0 + z K_x \\
 \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v^0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \varepsilon_y^0 + z K_y \\
 \gamma_{xy} &= \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \frac{\partial u^0}{\partial y} - 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial v^0}{\partial x} = \gamma_{xy}^0 + z K_{xy}
 \end{aligned} \right\} \quad (III.5)$$

Où les courbures $\{K\}$ sont définies comme suit :

$$K_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad K_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \text{ et } K_{xy} = -2 \frac{\partial^2 w}{\partial xy} \quad (III.6)$$

En combinant les équations (III.5) et (III.6) nous aurons :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (III.7)$$

Où :

ε_x^0 et ε_y^0 sont les déformations normales du plan médian du stratifié ;

γ_{xy}^0 est la distorsion du plan médian du stratifié ;

K_x et K_y sont les courbures de flexion du stratifié ;

Et K_{xy} est la courbure de torsion du stratifié.

La connaissance des déformations et des courbures du plan moyen du stratifié $\{\varepsilon^0\}$ et $\{K\}$ définit complètement l'état de déformation en tout point pris dans l'épaisseur de la plaque par la relation matricielle :

$$\{\varepsilon_x\} = \{\varepsilon^0\}_x + z \{K\}_x \quad (III.8)$$

Nous avons posé que les déformations varient linéairement dans l'épaisseur du stratifié, or nous savons que les caractéristiques élastiques sont différentes suivant les couches. En conséquence, les contraintes vont subir des discontinuités comme illustré dans la figure III.4.

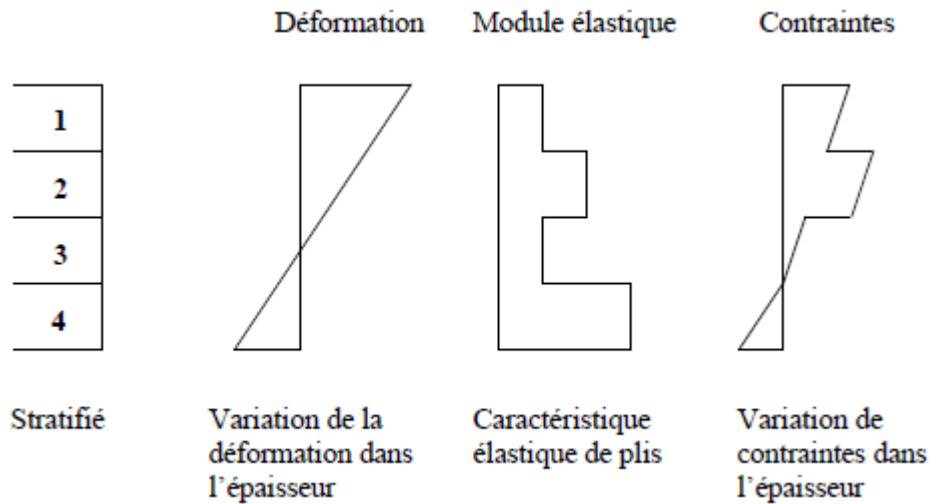


Figure III.4 : Schématisation de la répartition des efforts dans le stratifié

Connaissant les déformations dans chaque couche et les caractéristiques mécaniques, les contraintes s'en déduisent par :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (III.9)$$

Où :

σ_x , σ_y et τ_{xy} sont les contraintes dans le repère du stratifié ;

\bar{Q}_{ij} est la matrice de raideur du pli dans le repère du stratifié ;

Etz est la cote du pli (k) choisie à partir du plan médian.

III.2.5. Forces résultantes et moments agissant sur un stratifié

Les contraintes ainsi définies évoluent de façon discontinue dans l'épaisseur du stratifié. Elles sont remplacées par des efforts et des moments équivalents par unité de longueur, montrés dans la figure III.5 et qui sont appelés « efforts et moments généralisés ».

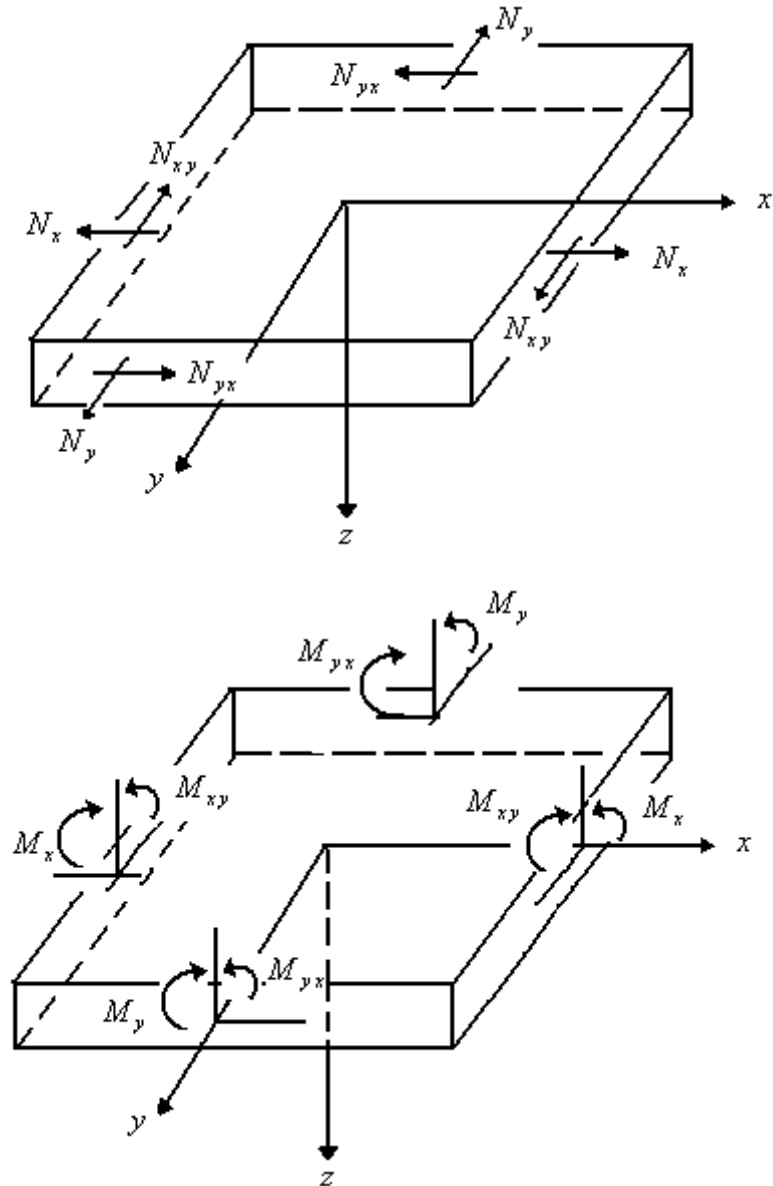


Figure III.5 :Forces et moments résultants

Pour un stratifié à N plis, l'ensemble des résultantes des efforts et des moments est :

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-T/2}^{T/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} .dz = \sum_{k=1}^N \int_{Z_{k-1}}^{Z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} .dz \tag{III.10}$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-T/2}^{T/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} .zdz = \sum_{k=1}^N \int_{Z_{k-1}}^{Z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} .dz \tag{III.11}$$

Où :T est l'épaisseur du stratifié ;

N_x , N_y et N_{xy} sont des forces par unité de longueur ;

M_x , M_y et M_{xy} sont des moments par unité de longueur ;

Et z_K et z_{K-1} sont définis dans la géométrie d'un stratifié à N plis qui est représenté sur la figure III.2.

III.2.6. Rigidité du stratifié:

En substituant l'expression (III.9) dans (III.10), les efforts dans le stratifié sont exprimés en termes de déformations et de courbures comme suit :

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{K=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_K + \left(\int_{z_{K-1}}^{z_K} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} \cdot dz + \int_{z_{K-1}}^{z_K} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \cdot z dz \right) \quad (\text{III.12})$$

De même, en substituant (III.9) dans (III.11), les moments dans le stratifié sont exprimés en termes de déformations et de courbures comme suit :

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{K=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_K + \left(\int_{z_{K-1}}^{z_K} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} \cdot z dz + \int_{z_{K-1}}^{z_K} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \cdot z^2 dz \right) \quad (\text{III.13})$$

Depuis le plan médian les déformations et les courbures ne sont pas des fonctions de z, elles peuvent être déplacées en dehors de l'intégrale et les équations (III.12) et (III.13) peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

$$[A_{ij}] = \sum_{k=1}^n [\overline{Q}_{ij}]_k (z_k - z_{k-1})$$

$$[B_{ij}] = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [\overline{Q}_{ij}]_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (\text{III.16})$$

$$[D_{ij}] = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [\overline{Q}_{ij}]_k (z_k^3 - z_{k-1}^3)$$

L'équation fondamentale de la théorie des stratifiés est donnée par :

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{Bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

Cette équation peut s'écrire sous une forme plus détaillée :

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

Il faut noter que $[A_{ij}]$ est « la matrice de membrane », $[B_{ij}]$ « la matrice de couplage membrane-flexion » et $[D_{ij}]$ est « la matrice de flexion ».

III.3. Orientation des fibres-Analyse

Dans cette partie, nous examinons l'orientation des fibres de renfort d'une plaque composite de type CFRP afin de pouvoir réaliser une optimisation visant à réduire les contraintes d'interface par l'orientation des fibres lors de l'élaboration de la présente méthode qu'on abordera dans le prochain chapitre.

Les caractéristiques mécaniques des sections sont :

$$E_2 \cdot I_2 = \frac{b_2}{D_{11}} \quad \text{et} \quad E_2 \cdot A_2 = \frac{b_2}{A_{11}} \quad (\text{III.19})$$

Où : b_2 est la largeur de la plaque composite CFRP ;

D'_{11} : est le premier terme de la matrice inverse $[D'_{ij}]$ de la matrice de flexion $[D_{ij}]$;

A'_{11} : est le premier terme de la matrice inverse $[A'_{ij}]$ de la matrice de membrane $[A_{ij}]$

].

La «matrice de membrane » $[A_{ij}]$ et la « matrice de flexion » $[D_{ij}]$ sont déterminées comme suit :

$$[A_{ij}] = \sum_{k=1}^n [\overline{Q}_{ij}]_k (z_k - z_{k-1}) \quad (\text{III.20})$$

$$[D_{ij}] = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [\overline{Q}_{ij}]_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (\text{III.21})$$

Où z_k est la côte du pli k avec $k = 1 \dots n$;

Et $[\overline{Q}_{ij}]$: « La matrice de rigidité » est déterminée à l'aide des équations ci-dessous :

$$\overline{Q}_{11} = Q_{11} m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2 n^2 + Q_{22} n^4 \quad (\text{III.22})$$

$$\overline{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})m^2 n^2 + Q_{12}(n^4 + m^4) \quad (\text{III.23})$$

$$\overline{Q}_{22} = Q_{11} n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2 n^2 + Q_{22} m^4 \quad (\text{III.24})$$

$$\overline{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})m^3 n + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})n^3 m \quad (\text{III.25})$$

$$\overline{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})m n^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})n m^3 \quad (\text{III.26})$$

$$\overline{Q}_{66} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})m n^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})n m^3 \quad (\text{III.27})$$

Où les paramètres Q_{11} , Q_{12} , Q_{16} , Q_{22} , Q_{26} , Q_{66} , m et n sont déterminés par :

$$\begin{aligned}
 Q_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} & Q_{22} &= \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} \\
 Q_{12} &= \frac{\nu_{12} E_2}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} = \frac{\nu_{21} E_1}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} & Q_{66} &= G_{12}
 \end{aligned}
 \tag{III.28}$$

Et : $m = \cos \theta$ Puis $n = \sin \theta$ (III.29)

Où :

E_1, E_2, ν_{12} et G_{12} sont des constantes pouvant être mesurées dans le laboratoire d'une façon exacte et représentant respectivement les modules d'élasticités E_1 et E_2 , le coefficient de poisson ν_{12} lié à E_1 et le module de cisaillement de la plaque composite G_{12} ;

θ est l'angle d'orientation de la fibre (couche) composite.

Il faut noter que le coefficient de poisson lié à E_2 est déterminé par la relation suivante :

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2}
 \tag{III.30}$$

Après avoir ainsi trouvé les matrices $[A_{ij}]$ et $[D_{ij}]$, la détermination de A'_{11} et de D'_{11} se fait comme suit :

$$[A'_{ij}] = [A_{ij}]^{-1} \quad \text{et} \quad [D'_{ij}] = [D_{ij}]^{-1}
 \tag{III.31}$$

A'_{11} et D'_{11} peuvent alors être tirés dans les matrices inverses trouvées avec :

$$[A'_{ij}] = \begin{bmatrix} \langle A'_{11} \rangle & A'_{12} & A'_{16} \\ A'_{12} & A'_{22} & A'_{26} \\ A'_{16} & A'_{26} & A'_{66} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [D'_{ij}] = \begin{bmatrix} \langle D'_{11} \rangle & D'_{12} & D'_{16} \\ D'_{12} & D'_{22} & D'_{26} \\ D'_{16} & D'_{26} & D'_{66} \end{bmatrix}
 \tag{III.32}$$

Ou encore : $A'_{11} = \frac{A_{22} \cdot A_{66}}{\det(A_{ij})}$ (III.33)

Avec : $\det(A_{ij}) = A_{66} \cdot \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{12} & A_{22} \end{vmatrix} = A_{66} \cdot [(A_{11} \cdot A_{22}) - (A_{12} \cdot A_{12})]$ (III.34)

$$\text{Et :} \quad \det(D_{ij}) = D_{66} \cdot \begin{vmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{12} & D_{22} \end{vmatrix} = D_{66} \cdot [(D_{11} \cdot D_{22}) - (D_{12} \cdot D_{12})] \quad (\text{III.35})$$

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé en première partie la théorie des plaques stratifiées, ce qui nous a permis d'élaborer les relations existantes entre les composantes des déformations et celles des déplacements. A partir de ces relations et en exprimant les efforts et les moments par unité de longueur, nous avons déterminé les matrices de membrane de flexion et de couplage. En seconde partie l'orientation des fibres a fait l'objet d'une analyse afin de montrer comment cette dernière intervient-elle dans notre présente méthode. De là, les paramètres A'_{11} et D'_{11} sont déterminés et utilisés pour le calcul des contraintes d'interface, qui par le biais de cette nouvelle méthode, sont fonction de l'angle d'orientation de la couche des fibres composites et du nombre de stratifiés.

Chapitre IV

Analyse et modélisation des poutres métalliques renforcées par collage de plaques composites

IV.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre une analyse des contraintes d'interface d'une plaque métallique ou composite collée à une poutre.

Cette recherche est utile pour l'amélioration du comportement mécanique de l'interface et de la conception des structures mixtes Composites-Béton Armé ou Composite-Acier.

Les matériaux composites ont été identifiés en tant que nouveaux matériaux innovateurs pour la réparation et le renforcement des structures. Ainsi, leur utilisation est une solution efficace pour augmenter la résistance globale des structures. Ces matériaux ont été utilisés avec succès pour réparer les structures métalliques aéronautiques pendant un certain nombre d'années [34-36]. Dans le domaine du génie civil, les plaques composites ont été principalement utilisées pour la réhabilitation des structures en béton, bien que le renforcement des structures métalliques utilisant ces plaques intéresse significativement les chercheurs ces dernières années. Les principaux avantages de ces plaques sont leur rapport de haute résistance/poids et leur excellente tenue aux attaques de corrosion et chimiques. Un sujet important surgissant dans l'étude des poutres en acier collées aux plaques est l'évaluation des interactions à l'interface acier-Plaque FRP. En fait ces interactions permettent la transmission des contraintes de la poutre à la plaque ; si ces contraintes vont au-delà d'une valeur limite, la rupture prématurée de la poutre renforcée (poutre ou plaque de renforcement) peut se produire.

La détermination des contraintes d'interface a fait l'objet de plusieurs recherches cette dernière décennie, concernant les poutres en acier ou en béton, renforcées par des plaques en acier ou en matériaux composites. A travers ces recherches, il a été démontré que les contraintes de cisaillement et les contraintes normales de l'interface sont influencées par le matériau et par les caractéristiques géométriques de la poutre.

Ainsi, plusieurs solutions analytiques ont été développées [37- 44]. Toutes ces solutions sont valables pour des matériaux élastiques linéaires et utilisent la même hypothèse, à savoir que couche l'adhésif est sujette à des contraintes normales et de cisaillement constantes à travers son épaisseur. Et, c'est cette hypothèse qui permet d'obtenir des solutions relativement simples. Pour ces solutions existantes, deux approches différentes ont été utilisées. Roberts [38] et Roberts et al [39] ont employé une approche d'analyse par étapes, alors que Vilnay [37], Stratford et al [40], Malek et al [41] et Smith et al [42, 45, 46] considèrent directement

les conditions de la compatibilité de déformation. Récemment, Tounsi[44] et Tounsi et al [47,48], ont développé des solutions théoriques pour les contraintes d'interface dans les poutres en béton renforcées par une plaque en FRP basées également sur les conditions de la compatibilité de déformation.

Des techniques très récentes sont mises au point (modélisations, expériences...) tels que les différents types de collage utilisant les matériaux composites types FRP, donnant des résultats appréciables. Ces types de collage ont pu diminuer l'influence de l'effet des contraintes d'interface qui sont affectées par le phénomène de vieillissement. Le modèle adopté décrit mieux la réponse réelle de la poutre en acier, de la plaque en FRP et permet l'évaluation des contraintes d'interface, dont la connaissance est très importante dans la conception de telles structures.

IV.2 Hypothèse de la présente méthode

Dans la présente analyse, et pour la détermination des contraintes d'interface au niveau de la couche d'adhésif, le modèle théorique développé est basé sur les hypothèses suivantes :

- La poutre métallique, la couche d'adhésif et la plaque composite ont un comportement élastique linéaire ;
- Les contraintes au niveau de la couche d'adhésif sont constantes à travers l'épaisseur de cette couche ;
- La poutre est parfaitement collée avec la plaque composite ;
- L'adhésif a pour seul rôle le transfert des contraintes de la poutre au composite ;
- Les déformations de l'adhérent 1 (poutre métallique) et 2 (plaque en composites) sont dues aux moments de flexion et aux efforts normaux.

Après une analyse de la méthode présentée par Tounsi [44] pour les poutres en Béton armé, une modélisation analytique s'en suit afin de valider la présente méthode en l'appliquant sur des poutres métalliques et enfin une modélisation numérique confirmant une fois de plus la méthode de Tounsi [44].

IV.3. Analyse

Un élément dx de la poutre métallique en I renforcée de la figure IV.1 est représenté dans la

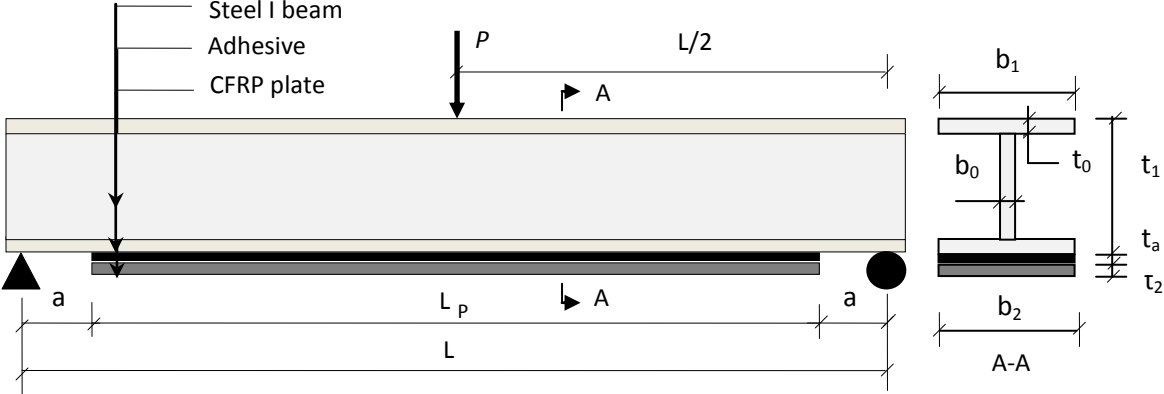


figure IV.2.

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

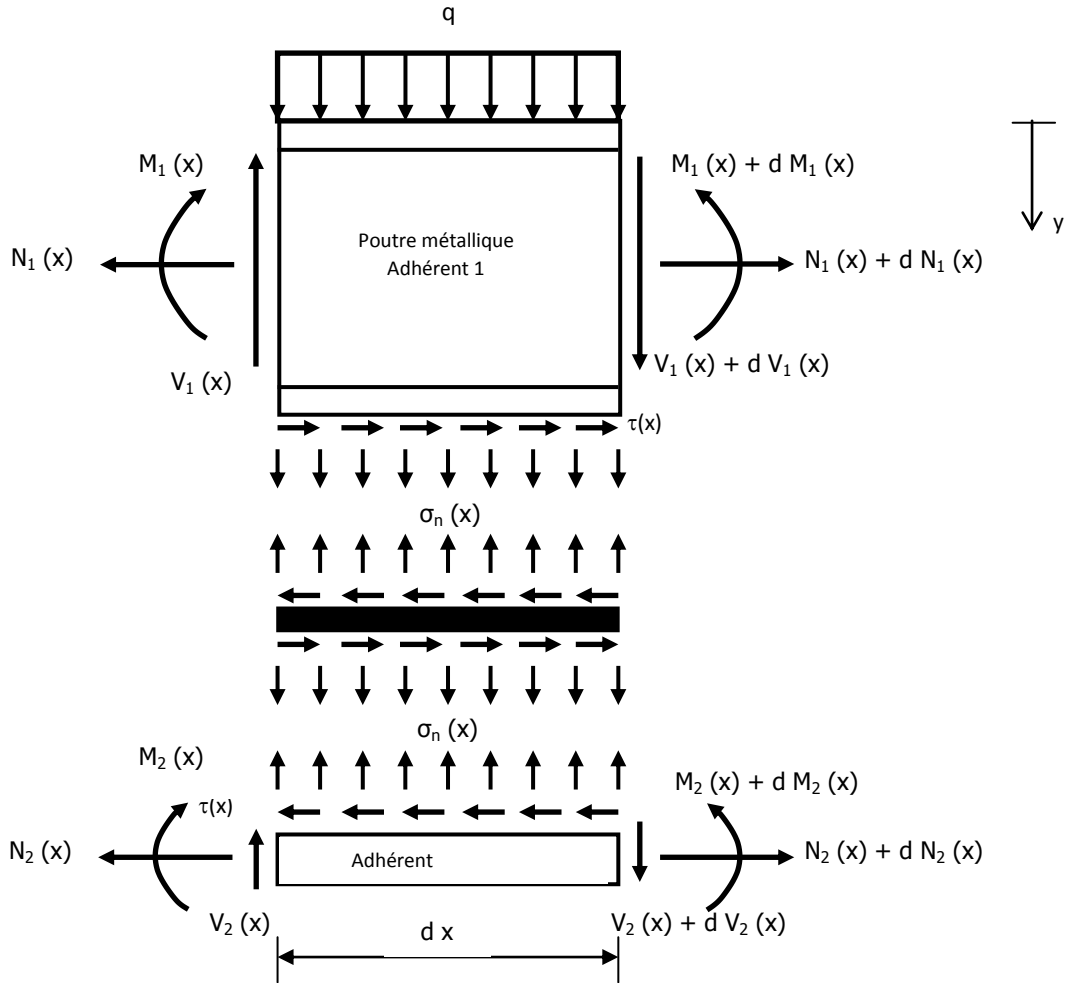


Figure IV.2 : Un segment différentiel de la poutre métallique renforcée par collage de plaque composite

IV.3.1. Les déformations

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

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \varepsilon_1^M(x) + \varepsilon_1^N(x) \quad (IV.1)$$

$$\varepsilon_2(x) = \frac{du_2(x)}{dx} = \varepsilon_2^M(x) + \varepsilon_2^N(x) \quad (IV.2)$$

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

Et : $\varepsilon_1^M(x)$ et $\varepsilon_2^M(x)$ sont les déformations induites par le moment fléchissant de l'adhérent 1 et de l'adhérent 2 respectivement, et peuvent être écrites comme suit :

$$\varepsilon_1^M(x) = \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) \quad \text{et} \quad \varepsilon_2^M(x) = \frac{-y_2}{E_2 I_2} M_2(x) \quad (\text{IV.3})$$

Où $E_1, E_2, I_1, I_2, M_1(x)$ et $M_2(x)$ sont respectivement les modules d'élasticité longitudinaux, les moments d'inertie et les moments fléchissant de l'adhérent 1 et l'adhérent 2 ;

y_1 et y_2 sont les distances entre la face inférieure de l'adhérent 1 et la face supérieure de l'adhérent 2 et leurs centres de gravité respectifs ;

$\varepsilon_2^N(x)$ et $\varepsilon_1^N(x)$ sont les déformations normales de la poutre IPE et de la plaque de renforcement et sont données comme suit :

$$\varepsilon_1^N(x) = \frac{du_1^N(x)}{dx} = \frac{N_1(x)}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{3G_1} \xi \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (\text{IV.4})$$

$$\varepsilon_2^N(x) = \frac{du_2^N(x)}{dx} = \frac{N_2(x)}{E_2 A_2} - \frac{t_2}{3G_2} \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (\text{IV.5})$$

Où :

A_1 et A_2 sont les sections transversales des adhérents 1 et 2, respectivement ;

$N_1(x)$ et $N_2(x)$ sont les forces axiales des adhérents 1 et 2, respectivement ;

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

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

Pour une section rectangulaire ($b_1=b_0$) on a $\xi = 1$ (Béton armé) ;

Pour une section en I on a $\xi < 1$ (Acier).

En substituant les équations (IV.3), (IV.4) et (IV.5) dans les équations (IV.1) et (IV.2) respectivement, les équations de déformation précédentes deviennent :

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1(x)}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{3G_1} \xi \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (\text{IV.7})$$

$$\varepsilon_2(x) = \frac{du_2(x)}{dx} = \frac{-y_2}{E_2 I_2} M_2(x) + \frac{N_2(x)}{E_2 A_2} - \frac{t_2}{3G_2} \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (\text{IV.8})$$

Comme la poutre est une IPE on a : $A_1 = 2b_1 t_0 + b_0(t_1 - 2t_0)$ (IV.9)

Et :
$$I_1 = \frac{b_0(t_1 - 2t_0)^3}{12} + 2 \left[\frac{b_1 t_0^3}{12} + b_1 t_0 \frac{(t_1 - t_0)^2}{4} \right]$$
 (IV.10)

IV.3.2 Distribution des contraintes de cisaillement dans l'interface composite–Acier

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

$$\tau_a = \tau(x) = K_s [u_2(x) - u_1(x)] \quad (\text{IV.11})$$

Où :

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

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

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

En dérivant l'expression (IV.11) nous obtenons :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = K_s \left[\frac{du_2(x)}{dx} - \frac{du_1(x)}{dx} \right] \quad (\text{IV.12})$$

En substituant les équations (IV.7) et (IV.8) dans l'équation (IV.12) nous aurons :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = K_s \left[\frac{-y_2}{E_2 I_2} M_2(x) + \frac{N_2(x)}{E_2 A_2} - \frac{t_2}{3G_2} \frac{d\tau(x)}{dx} - \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) - \frac{N_1(x)}{E_1 A_1} - \frac{t_1}{3G_1} \xi \frac{d\tau(x)}{dx} \right] \quad (\text{IV.13})$$

En dérivant l'équation (IV.13) une deuxième fois, nous obtenons :

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} = K_s \left[\begin{aligned} & -\frac{y_2}{E_2 I_2} \frac{dM_2(x)}{dx} + \frac{1}{E_2 A_2} \frac{dN_2(x)}{dx} - \frac{t_2}{3G_2} \frac{d^2\tau(x)}{dx^2} - \frac{y_1}{E_1 I_1} \frac{dM_1(x)}{dx} - \\ & - \frac{1}{E_1 A_1} \frac{dN_1(x)}{dx} - \frac{t_1}{3G_1} \xi \frac{d^2\tau(x)}{dx^2} \end{aligned} \right] \quad (IV.14)$$

L'équilibre horizontal donne :

$$\frac{dN_1(x)}{dx} = -b_2 \tau(x) \quad (IV.15)$$

$$\frac{dN_2(x)}{dx} = b_2 \tau(x) \quad (IV.16)$$

$$\text{Où : } N_2(x) = N(x) = b_2 \int_0^x \tau(x) dx \quad (IV.17)$$

$$\text{Et : } N_1(x) = -N(x) = -b_2 \int_0^x \tau(x) dx \quad (IV.18)$$

Avec : b_2 la largeur de la plaque composite.

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

$$M_1(x) = R M_2(x) \quad (IV.19)$$

$$\text{Avec : } R = \frac{E_1 I_1}{E_2 I_2} \quad (IV.20)$$

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

$$M_T(x) = M_1(x) + M_2(x) + N(x)(y_1 + y_2 + t_a) \quad (IV.21)$$

Où : $M_T(x)$ est le moment total appliqué à la poutre hybride (Acier - Composite).

Le moment fléchissant dans chaque adhérent est exprimé en fonction du moment total appliqué et de la contrainte de cisaillement à l'interface.

En remplaçant les équations (IV.15), (IV.16), et (IV.19) dans l'équation (IV.21), on tire :

$$M_1(x) = \frac{R}{(R+1)} \left[M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a) dx \right] \quad (IV.22)$$

$$M_2(x) = \frac{1}{(R+1)} \left[M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a) dx \right] \quad (IV.23)$$

En dérivant les expressions (IV.22) et (IV.23), nous aurons :

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = V_1(x) = \frac{R}{(R+1)} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (IV.24)$$

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = V_2(x) = \frac{1}{(R+1)} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (IV.25)$$

La substitution des forces de cisaillement des équations (IV.24) et (IV.25) et les forces axiales des équations (IV.17) et (IV.18) dans l'équation (IV.14) nous donne l'équation différentielle régissant des contraintes de cisaillement d'interface suivante :

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} = K_s \left[\frac{-y_2}{E_2 I_2} \left(\frac{1}{(R+1)} [V_T(x) - b_2 (y_1 + y_2 + t_a) \tau(x)] \right) + \frac{b_2}{E_2 A_2} \tau(x) - \right. \\ \left. \frac{y_1}{E_1 I_1} \left(\frac{R}{(R+1)} [V_T(x) - b_2 (y_1 + y_2 + t_a) \tau(x)] + \frac{b_2}{E_1 A_1} \tau(x) \right) - K_s \left[\frac{t_2}{3G_2} + \frac{t_1}{3G_1} \xi \right] \frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} \right] \end{aligned} \quad (IV.26)$$

L'équation ci-dessus peut être réécrite comme suit :

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} - K_1 b_2 \left(\frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} + \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right) \tau(x) + K_1 \left(\frac{y_1 + y_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) V_T(x) = 0 \quad (IV.27)$$

Avec :

$$K_1 = \frac{1}{\frac{t_a}{G_a} + \frac{t_2}{3G_2} + \frac{t_1}{3G_1} \xi} \quad (IV.28)$$

La solution de l'équation différentielle (IV.27) ci-dessus est donnée par :

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sinh(\lambda x) + m_1 V_T(x) \quad (IV.29)$$

$$\text{Où : } \lambda^2 = K_1 b_2 \left(\frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} + \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right) \quad (\text{IV.30})$$

$$\text{Et : } m_1 = \frac{K_1}{\lambda^2} \left(\frac{(y_1 + y_2)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \quad (\text{IV.31})$$

Il faut noter que B1 et B2 sont des constantes d'intégration déterminées à partir des conditions aux limites.

Dans la présente étude, une poutre simplement appuyée sollicitée par une charge uniformément répartie et une charge ponctuelle est analysée.

IV.3.3. Application des conditions aux limites

Pour l'application des conditions aux limites, seul le cas d'une charge uniformément répartie sera étudié et ceux des charges ponctuelles seront juste exprimés par leurs résultats finaux.

La solution de l'équation différentielle plus haut est :

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sinh(\lambda x) + m_1 V_T(x) \quad (\text{IV.29})$$

En considérant les conditions initiales on a :

$$\tau\left(\frac{L_p}{2}\right) = B_1 \cosh\left(\lambda \frac{L_p}{2}\right) + B_2 \sinh\left(\lambda \frac{L_p}{2}\right) + m_1 V_T\left(\frac{L_p}{2}\right) = 0 \quad (\text{IV.32})$$

$$\text{À l'extrémité de la plaque composite, on a : } N_1(0) = N_2(0) = M_2(0) = 0 \quad (\text{IV.33})$$

$$\text{Or, on sait que : } M_1(0) = M_T(0) = \frac{qa}{2}(L - a) \quad (\text{IV.34})$$

En remplaçant x=0 dans l'équation (IV.13), on tire l'expression suivante :

$$\frac{d\tau(x=0)}{dx} = -\frac{K_1 y_1}{E_1 I_1} \frac{qa}{2}(L - a) \quad (\text{IV.35})$$

$$\text{En posant : } m_2 = \frac{K_1 y_1}{E_1 I_1}$$

On obtient :

$$\frac{d\tau(x=0)}{dx} = -\frac{m_2 qa}{2}(L-a) \quad (IV.36)$$

On sait aussi que : $V_T(x) = \frac{qL}{2} - qx'$ avec $x' = x + a$ (IV.37)

$$x = \frac{L_p}{2} \longrightarrow x' = \frac{L}{2} \quad \text{d'où on a :} \quad V_T\left(\frac{L_p}{2}\right) = 0 \quad (IV.38)$$

En substituant (IV.37) dans l'équation (IV.29) puis en dérivant l'équation (IV.29) substituée on remplace x par 0 et on tire la constante B_2 .

On trouve alors : $B_2 = -\frac{m_2 qa}{2\lambda}(L-a) + \frac{m_1}{\lambda}q$ (IV.39)

En substituant (IV.38) dans l'équation (IV.32) on tire B_1 comme suit :

$$B_1 = -B_2 \tanh\left(\lambda \frac{L_p}{2}\right) \quad (IV.40)$$

Comme dans les cas pratiques, on a : $\frac{\lambda L_p}{2} > 10 \longrightarrow \tanh\left(\frac{\lambda L_p}{2}\right) \approx 1$

D'où : $B_1 = -B_2$ (IV.41)

On sait que : $\text{Sinh}(\lambda x) = \frac{e^{\lambda x} - e^{-\lambda x}}{2}$ Et que : $\text{Cosh}(\lambda x) = \frac{e^{\lambda x} + e^{-\lambda x}}{2}$ (IV.42)

En remplaçant (IV.37), (IV.39), (IV.41) et (IV.42) dans l'équation (IV.29), on aboutit à l'expression suivante :

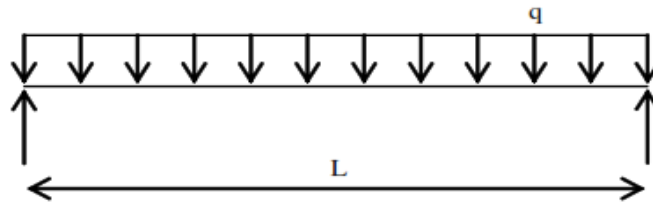


Figure IV.3: Poutre sous une charge uniformément répartie q

$$\tau(x) = \left[\frac{m_2 a}{2\lambda}(L-a) - m_1 \right] \frac{qe^{-\lambda x}}{\lambda} + m_1 q \left[\frac{L}{2} - x - a \right] \text{ pour } : 0 \leq x \leq L_p \quad (IV.43)$$

L'équation (IV.43) ci-dessus représente l'expression de la contrainte de cisaillement sous une charge uniformément répartie.

D'une manière identique, en appliquant les conditions aux limites dans le cas d'une charge ponctuelle, on obtient l'expression ci-dessous :

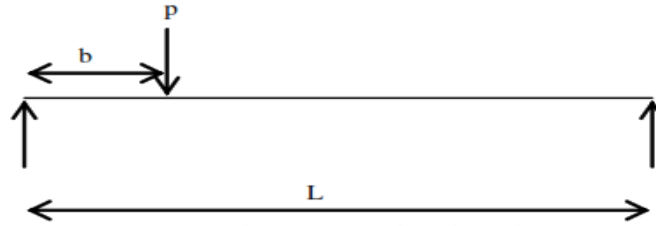


Figure IV.4 : Poutre sous une charge ponctuelle P

Pour $a < b$, on a :

$$\tau(x) = \begin{cases} \frac{m_2}{\lambda} Pa \left(1 - \frac{b}{L}\right) e^{-\lambda x} + m_1 P \left(1 - \frac{b}{L}\right) - m_1 P \text{Cosh}(\lambda x) e^{-k} \longrightarrow 0 \leq x \leq (b - a) \\ \frac{m_2}{\lambda} Pa \left(1 - \frac{b}{L}\right) e^{-\lambda x} - m_1 P \frac{b}{L} + m_1 P \text{Sinh}(k) e^{-\lambda x} \longrightarrow (b - a) \leq x \leq L_p \end{cases} \quad (\text{IV.44})$$

Et pour $a > b$, on aura :

$$\tau(x) = \frac{m_2}{\lambda} Pb \left(1 - \frac{a}{L}\right) e^{-\lambda x} - m_1 P \frac{b}{L} \text{ pour : } 0 \leq x \leq L_p \quad (\text{IV.45})$$

Il faut noter que : $k = \lambda(b - a)$

Et dans la même optique que celle de l'application des conditions aux limites dans le cas de deux charges ponctuelles, on obtient l'expression ci-dessous :

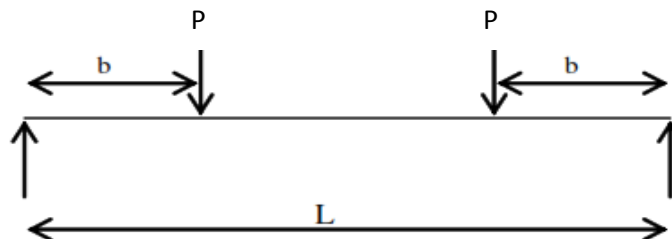


Figure IV.5 : Poutre sous deux charges ponctuelles symétriques : P

Pour $a < b$, on a :

(IV.46)

$$\tau(x) = \begin{cases} \frac{m_2}{\lambda} P a e^{-\lambda x} + m_1 P - m_1 P \text{Cosh}(\lambda x) e^{-k} \longrightarrow 0 \leq x \leq (b-a) \\ \frac{m_2}{\lambda} P a e^{-\lambda x} + m_1 P \text{Sinh}(k) e^{-\lambda x} \longrightarrow (b-a) \leq x \leq L_p \end{cases}$$

Et pour $a > b$, on aura :

$$\tau(x) = \frac{m_2}{\lambda} P b e^{-\lambda x} \quad 0 \leq x \leq L_p \quad (\text{IV.47})$$

IV.3.4. Distribution des contraintes normales dans l'interface composite-Acier

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

$$\sigma_n(x) = K_n \Delta w(x) = K_n [w_2(x) - w_1(x)] \quad (\text{IV.48})$$

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

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

$$K_n = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x)} = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x) / t_a} \left(\frac{1}{t_a} \right) = \frac{E_a}{t_a} \quad (\text{IV.49})$$

En dérivant l'équation (IV.48) deux fois, il en résulte :

$$\frac{d^2 \sigma_n(x)}{dx^2} = K_n \left[\frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} - \frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} \right] \quad (\text{IV.50})$$

En dérivant encore deux fois l'équation (IV.50), on obtient :

$$\frac{d^4 \sigma_n(x)}{dx^4} = K_n \left[\frac{d^4 w_2(x)}{dx^4} - \frac{d^4 w_1(x)}{dx^4} \right] \quad (\text{IV.51})$$

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

$$\frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} = -\frac{M_1(x)}{E_1 I_1} \quad \text{et} \quad \frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} = -\frac{M_2(x)}{E_2 I_2} \quad (\text{IV.52})$$

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

$$\text{L'adhérent 1 : } \frac{dM_1(x)}{dx} = V_1(x) - b_2 y_1 \tau(x) \quad \text{et} \quad \frac{dV_1(x)}{dx} = -b_2 \sigma_n(x) - q \quad (\text{IV.53})$$

$$\text{L'adhérent 2 : } \frac{dM_2(x)}{dx} = V_2(x) - b_2 y_2 \tau(x) \quad \text{et} \quad \frac{dV_2(x)}{dx} = b_2 \sigma_n(x) \quad (\text{IV.54})$$

En substituant les dérivées des équations (IV.53) et (IV.54) dans l'équation (IV.52) dérivée deux fois, on obtient :

$$\text{L'adhérent 1 : } \frac{d^4 w_1(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_1 I_1} b_2 \sigma(x) + \frac{y_1}{E_1 I_1} b_2 \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_1 I_1} \quad (\text{IV.55})$$

$$\text{L'adhérent 2 : } \frac{d^4 w_2(x)}{dx^4} = -\frac{1}{E_2 I_2} b_2 \sigma(x) + \frac{y_2}{E_2 I_2} b_2 \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (\text{IV.56})$$

La substitution des équations (IV.55) et (IV.56) dans la quatrième dérivée de la contrainte normale obtenue à partir de l'équation (IV.51) donne l'équation différentielle régissant la contrainte normale d'interface :

$$\frac{d^4 \sigma_n(x)}{dx^4} + \frac{E_a b_2}{t_a} \left(\frac{1}{E_1 I_1} + \frac{1}{E_2 I_2} \right) \sigma_n(x) + \frac{E_a b_2}{t_a} \left(\frac{y_1}{E_1 I_1} - \frac{y_2}{E_2 I_2} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q E_a}{t_a E_1 I_1} = 0 \quad (\text{IV.57})$$

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

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] + e^{\beta x} [C_3 \cos(\beta x) + C_4 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (\text{IV.58})$$

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

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (\text{IV.59})$$

$$\text{Où : } \beta = \sqrt[4]{\frac{E_a b_2}{4 t_a} \left(\frac{1}{E_1 I_1} + \frac{1}{E_2 I_2} \right)} \quad (\text{IV.60})$$

$$n_1 = \left(\frac{y_1 E_2 I_2 - y_2 E_1 I_1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \text{ et } n_2 = \frac{E_2 I_2}{b_2 (E_1 I_1 + E_2 I_2)} \quad (\text{IV.61})$$

Les constantes d'intégration C_1 et C_2 déterminées à partir des conditions aux limites sont données par :

$$C_1 = \frac{E_a}{2\beta^3 t_a E_1 I_1} [V_T(0) + \beta M_T(0)] - \frac{n_3}{2\beta^3} \tau(0) + \frac{n_1}{2\beta^3} \left(\frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \quad (IV.62)$$

$$C_2 = -\frac{E_a}{2\beta^2 t_a E_1 I_1} M_T(0) - \frac{n_1}{2\beta^2} \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \quad (IV.63)$$

Où :

$$n_3 = \frac{E_a b_2}{t_a} \left(\frac{y_1}{E_1 I_1} - \frac{y_2}{E_2 I_2} \right) \quad (IV.64)$$

IV.4. Validation de la méthode

La présente méthode a été validée en effectuant une comparaison des résultats des contraintes d'interfaces de la présente méthode avec ceux obtenus à partir des solutions analytiques telles que : la méthode de Tounsi [44] ou de Smith et al [42]. Pour une poutre endommagée simplement appuyée, le renforcement par plaques composites de types CFRP et GFRP, aussi bien que par des plaques métalliques est analysé.

Les caractéristiques physiques et les propriétés mécaniques des matériaux ainsi que les autres paramètres utilisés sont reportés aux tableaux IV.1 et IV.2.

IV.4.1. Cas d'une plaque de renforcement

Les résultats des contraintes maximales de l'interface de la présente méthode, obtenus analytiquement pour une poutre en béton armé sous chargement uniforme et sous charge concentrée au milieu, coïncident avec ceux issus de la méthode de Tounsi [44] comme cela est illustré dans le tableau IV.3.

Tableau IV.1 : Propriétés géométriques et mécaniques des matériaux

Composantes	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Module de Young (MPa)	Coefficient de poisson	Module de cisaillement
Adhésif	$b_a = 200$	$t_a = 2$	$E_a = 3000$	0,35	—
GFRP	$b_2 = 200$	$t_2 = 4$	$E_2 = 50000$	0,28	$G_{1,2} = 5000$
CFRP	$b_2 = 200$	$t_2 = 4$	$E_2 = 140000$	0,28	$G_{1,2} = 5000$
Acier	$b_2 = 200$	$t_2 = 4$	$E_2 = 200000$	0,3	—

BA	$b_1 = 200$	$t_1 = 300$	$E_1 = 30000$	0,18	–
IPE	$b_1 = 150$ $b_0 = 7,1$	$t_1 = 300$ $t_0 = 10,7$	$E_1 = 210000$	0,3	–

Tableau IV.2 : Paramètres des charges et dimensions

Composantes	Valeurs
Charge concentrée	$P = 150 \text{ KN}$
Charge répartie	$q = 50 \text{ KN/m}$
Longueur totale	$L = 3000 \text{ mm}$
Longueur plaque	$L_p = 2400 \text{ mm}$
Distance entre appui et plaque	$a = 300 \text{ mm}$

Les figures IV.6 et IV.7 illustrent la validation de la présente méthode analytique pour une poutre métallique IPE 300 aussi bien pour un chargement uniformément réparti que pour une charge concentrée au milieu. En ce qui est des contraintes maximales, elles sont présentées dans le tableau IV.3.

Tableau IV.3 : Comparaisons des contraintes maximales

Plaque	Méthode	Charge uniforme		Charge concentrée	
		τ (MPa)	σ (MPa)	τ (MPa)	σ (MPa)
CFRP	Smith et al [42]	3.834	2.100	4.310	2.364
	Tounsi [44]	1.791	1.078	2.051	1.234
	Présente méthode BA	1.791	1.078	2.051	1.234
	Présente méthode IPE	2.385	1.355	2.692	1.531
GFRP	Smith et al [42]	2.392	1.640	2.677	1.837

	Tounsi [44]	1.085	0.826	1.228	0.935
	Présente méthode BA	1.085	0.826	1.228	0.935
	Présente méthode IPE	1.477	1.055	1.658	1.185
Acier	Smith et al [42]	4.443	2.247	5.003	2.533
	Tounsi [44]	2.120	1.175	2.438	1.350
	Présente méthode BA	2.120	1.175	2.438	1.350
	Présente méthode IPE	2.455	1.397	3.251	1.697

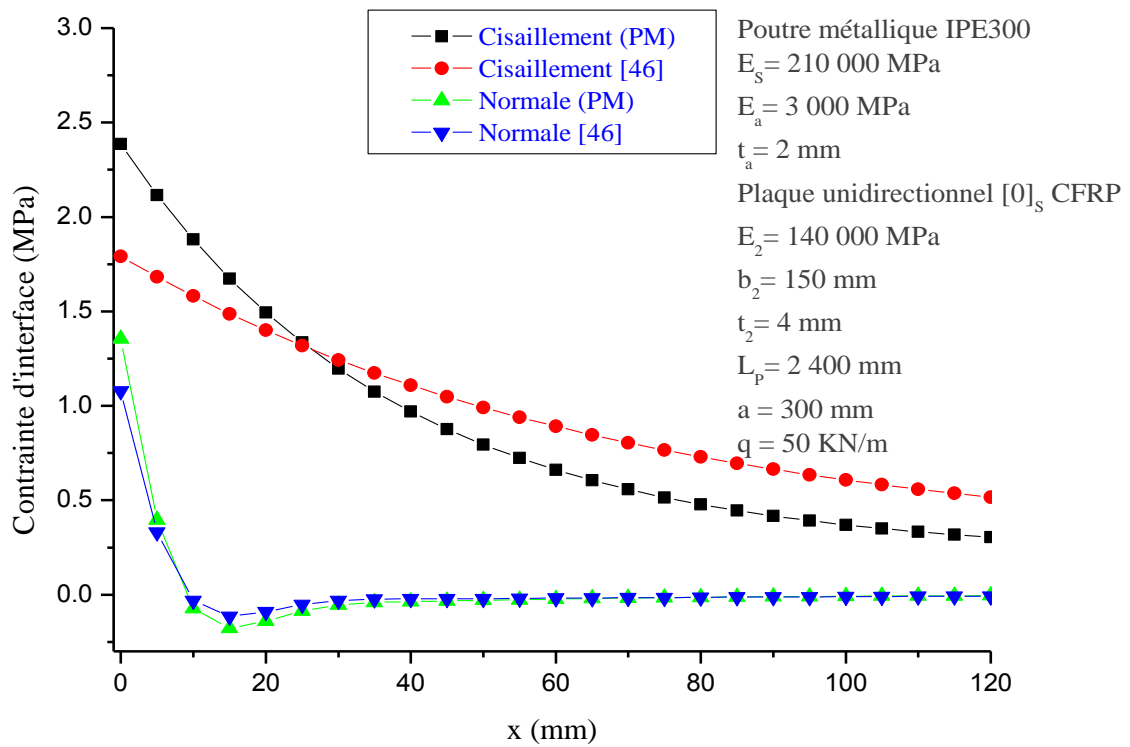


Figure IV. 6 : Validation de la présente méthode pour le cas d'une charge uniformément répartie

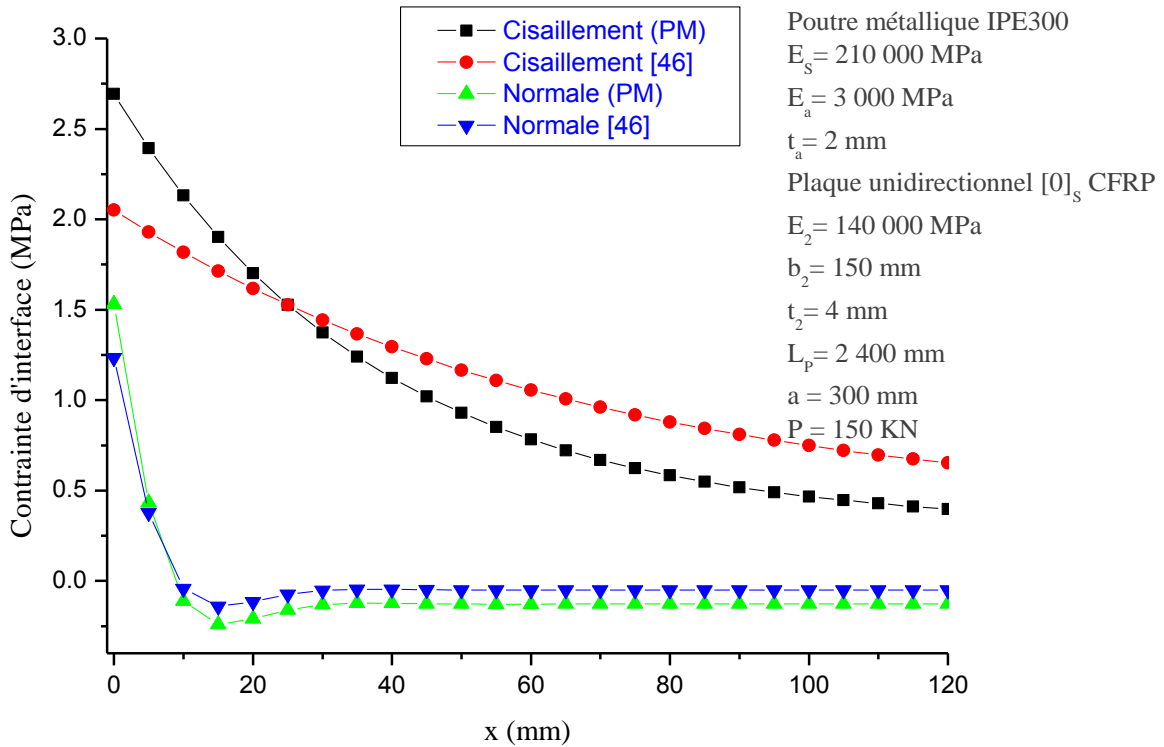


Figure IV. 7 : Validation de la présente méthode pour le cas d'une charge concentrée au milieu

IV.4.2 Cas d'une stratification de la plaque

La validation de la présente méthode tenant compte de la stratification et de l'orientation des fibres des couches composites a permis de pouvoir effectuer des comparaisons des contraintes d'interfaces afin de déceler les meilleures combinaisons possibles suivant la variation des paramètres considérés. Ainsi les figures ci-dessous sont illustrées pour mieux expliquer l'effet et surtout l'avantage de la présente méthode.

IV.4.2.1. Variation du stratifié

La figure IV.8 montre que le nombre de couches n'influe pas sur les contraintes d'interface dans le cas où indépendamment du nombre de couches du stratifié, l'épaisseur de la plaque composite reste la même et l'orientation de toutes les fibres qui constituent le composite reste la même aussi.

La figure IV.9 montre que les contraintes d'interfaces liées au stratifié $[0_{16}]_s$ sont supérieures par rapport à celles liées au stratifié $[0_8]_s$, avec une plus grande différence pour les contraintes maximales. Ainsi la variation des contraintes d'interfaces est certainement due à celle de l'épaisseur du composite.

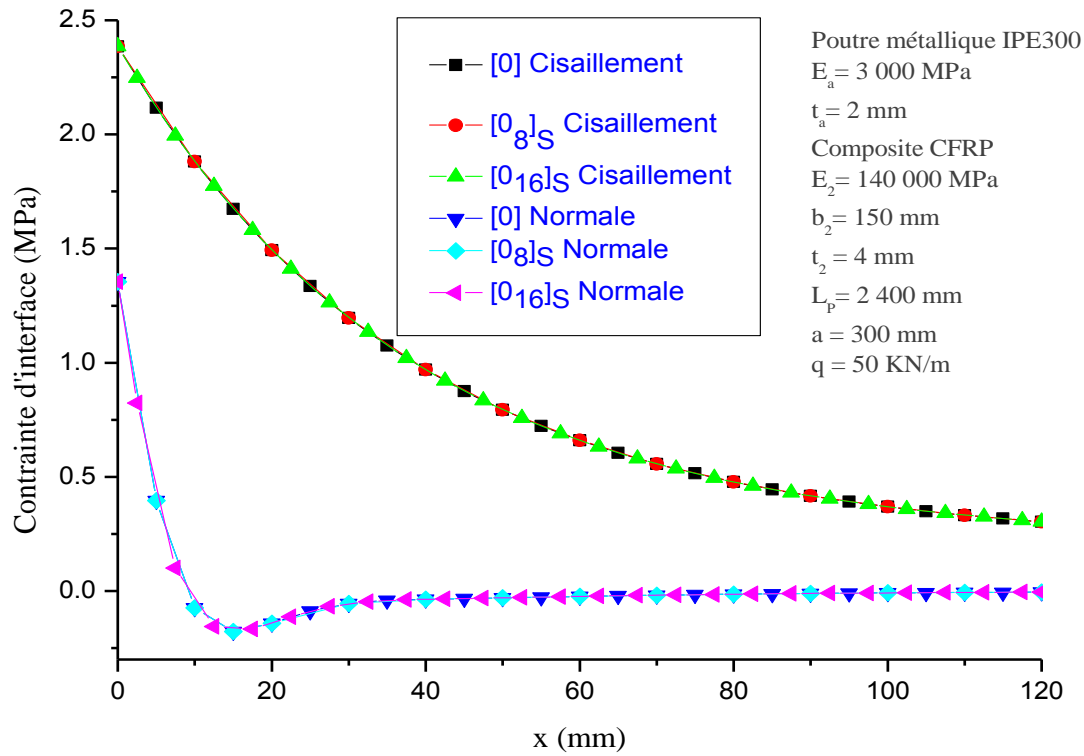


Figure IV. 8 : Comparaison des contraintes d'interface pour un chargement uniforme en fonction du nombre de couches du composite

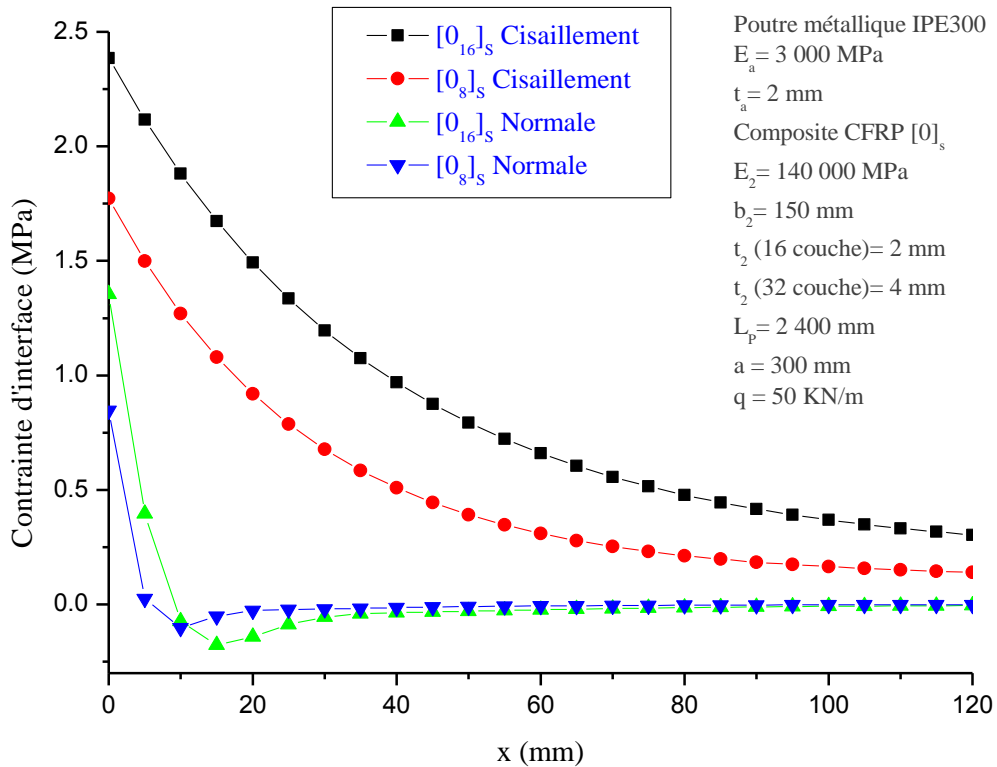


Figure IV. 9 : Comparaison des contraintes d'interface pour un chargement uniforme en fonction du nombre de couches et de l'épaisseur

IV.4.2.2 Variation de l'orientation des fibres composites

Dans cette partie, le composite étudié est du type CFRP avec une épaisseur de 4 mm et constitué de 16 couches de fibres. Les autres paramètres resteront les mêmes que les précédents.

La figure IV.10 montre que les contraintes d'interfaces maximales diminuent au fur et à mesure que l'angle d'orientation des fibres θ augmente. Ainsi la variation des contraintes est due à l'angle d'orientation.

La figure IV.11 montre également une variation des contraintes d'interfaces en fonction des angles, mais néanmoins, même si le positionnement ainsi que l'orientation sont différents, les contraintes d'interfaces restent les mêmes pour des angles d'orientation de signes contraires ($[45_8]_S, [-45_8]_S$).

Les figures IV.11 et IV.12 montrent que certaines combinaisons d'orientation des fibres favorisent une réduction des contraintes d'interfaces qu'elles soient de cisaillement ou normales.

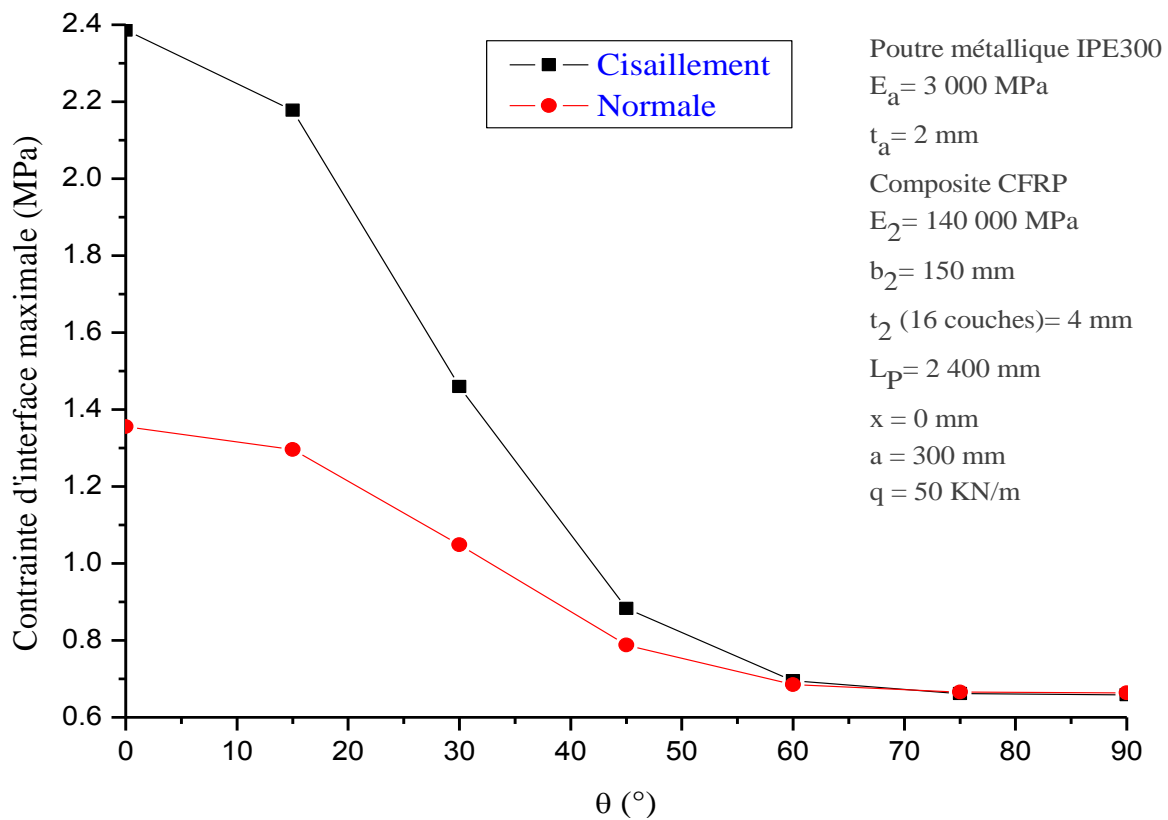


Figure IV. 10 : Variations des contraintes d'interfaces maximales en fonction de l'angle d'orientation θ

Ainsi les combinaisons étudiées sont classées des contraintes d'interfaces les plus élevées à celles les plus réduites comme suit : $[0_8]_s$, $[0_4/90_4]_s$, $[45_4/-45_4]_s$ et $[90_8]_s$. Ce qui montre bien que l'alignement des fibres dans l'axe de la poutre donne des contraintes d'interface importantes.

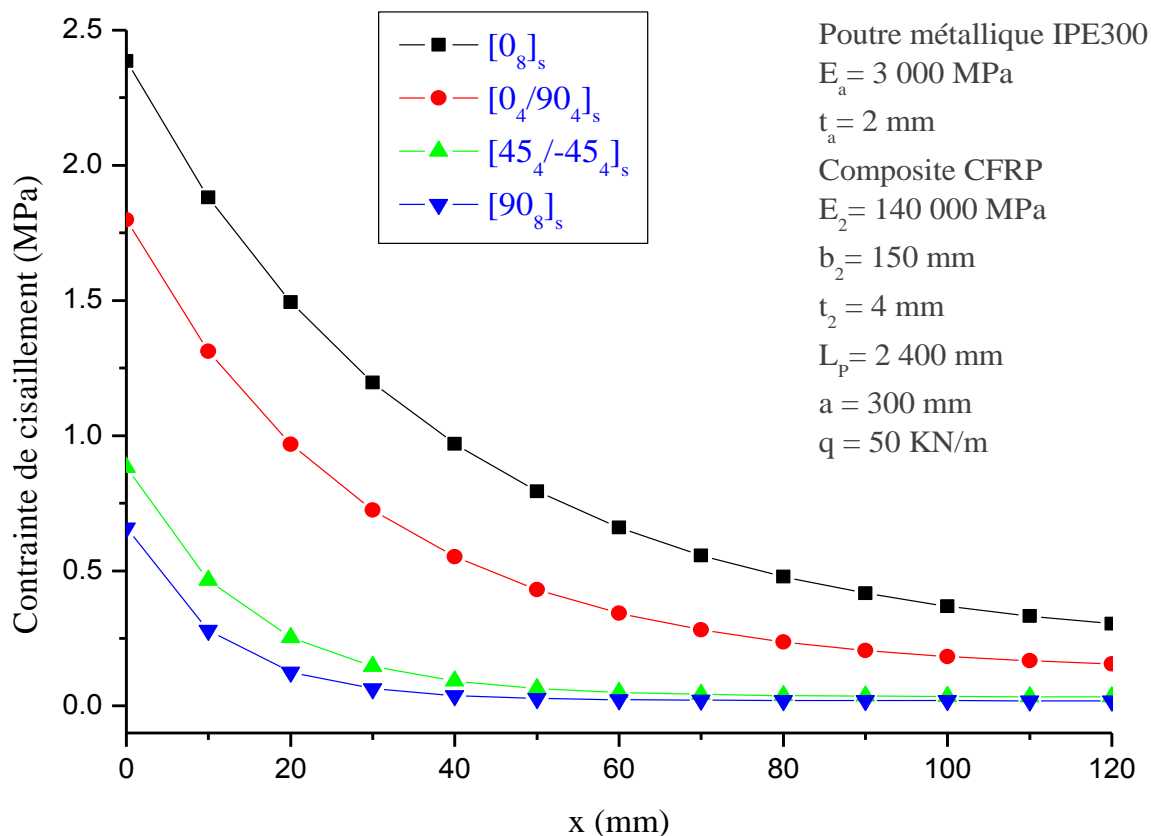


Figure IV. 11 : Comparaison des contraintes d'interface de cisaillement en fonction de l'orientation de chaque couche (combinaisons d'orientation)

IV.4.3. Rigidité des plaques CFRP, GRFP et métallique

Dans cette partie, nous présentons les résultats de la présente méthode afin d'examiner l'efficacité des plaques utilisées pour le renforcement des poutres métalliques.

Ainsi une étude comparative est illustrée afin de déterminer la ou les plaques les plus efficaces pour un quelconque renforcement ou réparation.

Cette étude est effectuée pour deux types de chargement : Chargement uniforme et chargement concentré.

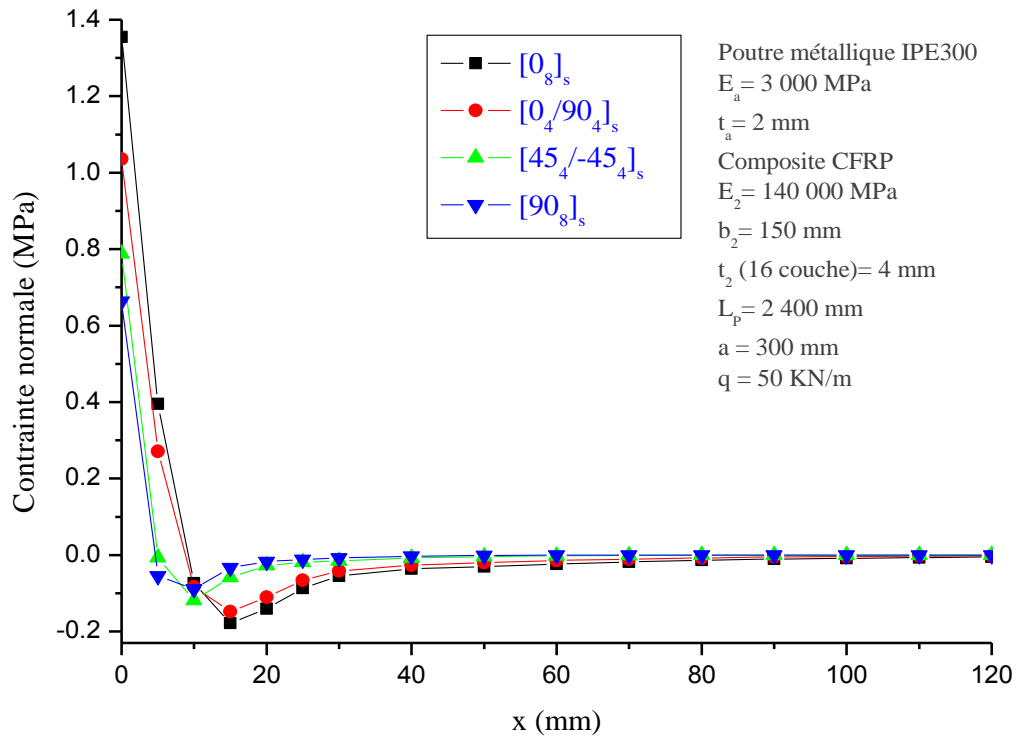


Figure IV. 12 : Comparaison des contraintes d'interface normales en fonction de l'orientation de chaque couche (combinaisons d'orientation)

IV.4.3.1 Chargement uniforme

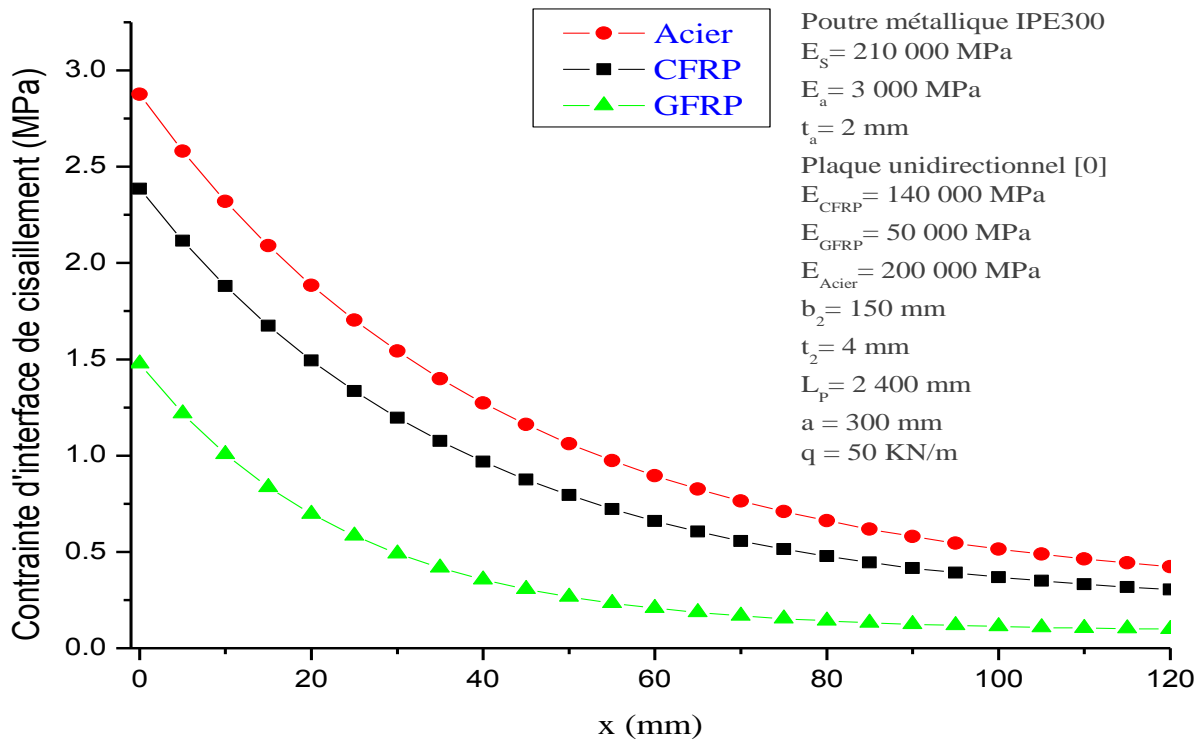


Figure IV. 13 : Comparaison des contraintes d'interface de cisaillement des plaques de renforcement CFRP, GRFP et métallique, pour une charge uniformément répartie

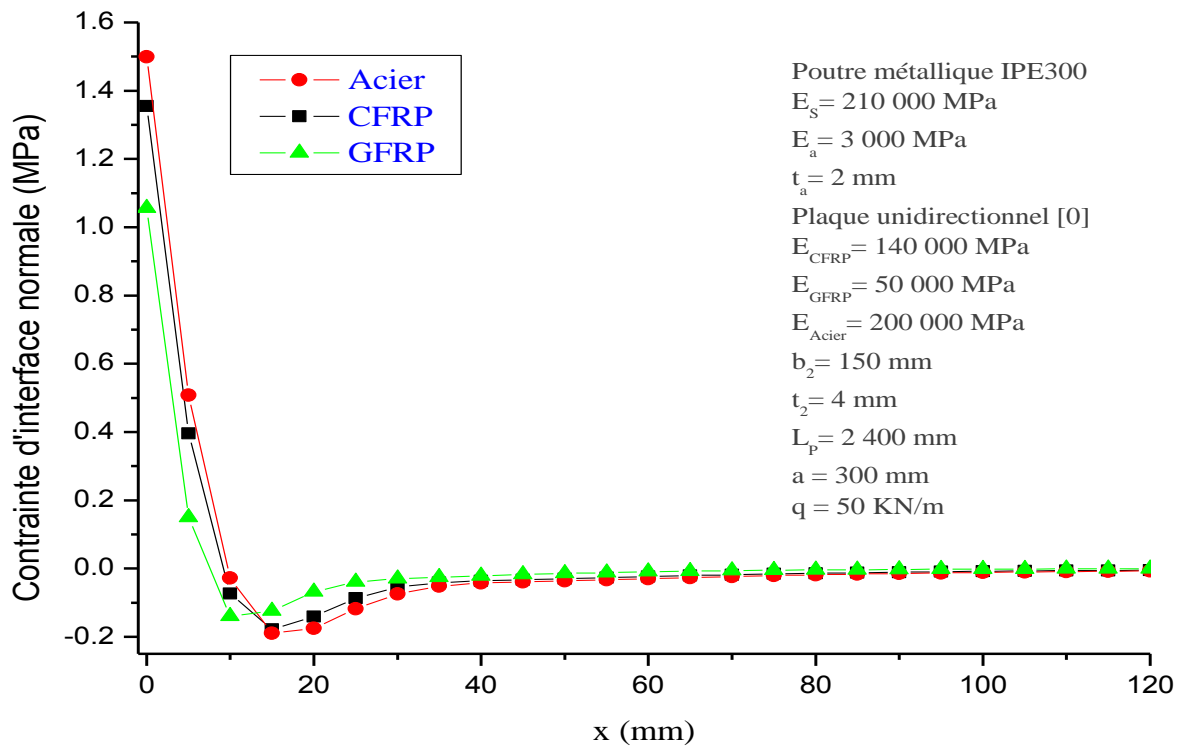


Figure IV. 14 : Comparaison des contraintes d'interface normales des plaques de renforcement CFRP, GRFP et métallique, pour une charge uniformément répartie

IV.4.3.2. Chargement ponctuel concentré au milieu

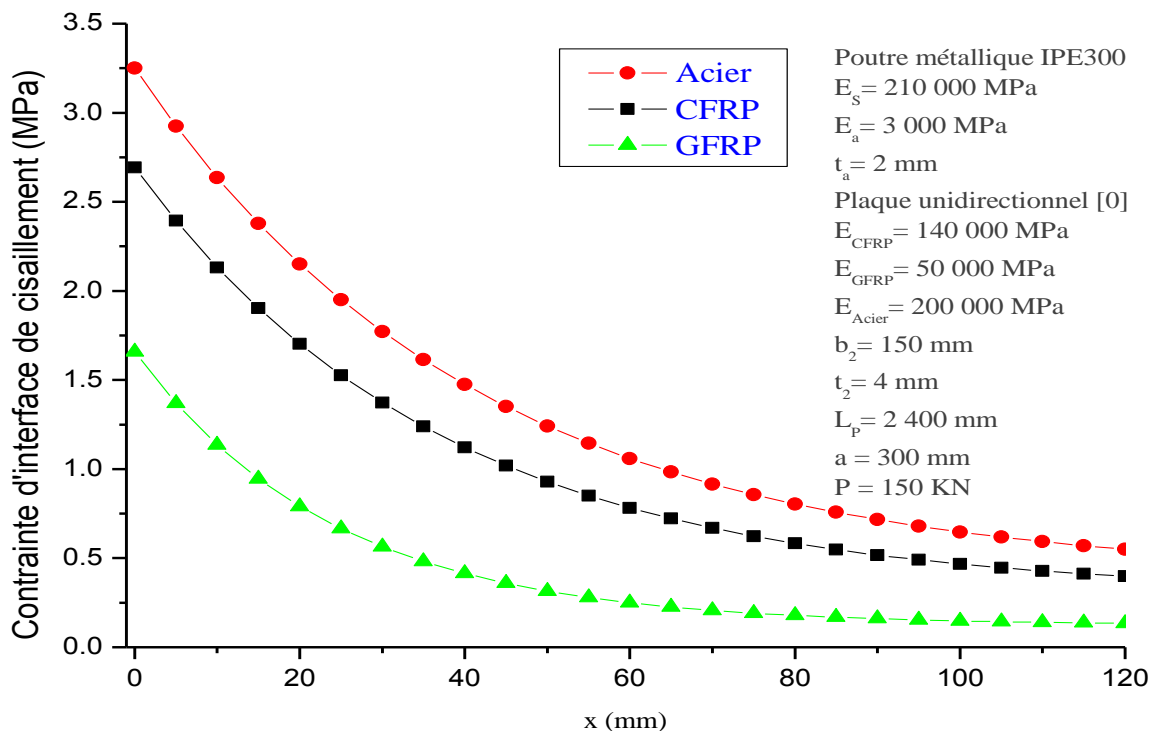


Figure IV. 15 : Comparaison des contraintes d'interface de cisaillement des plaques de renforcement CFRP, GRFP et métallique, pour une charge concentrée au milieu

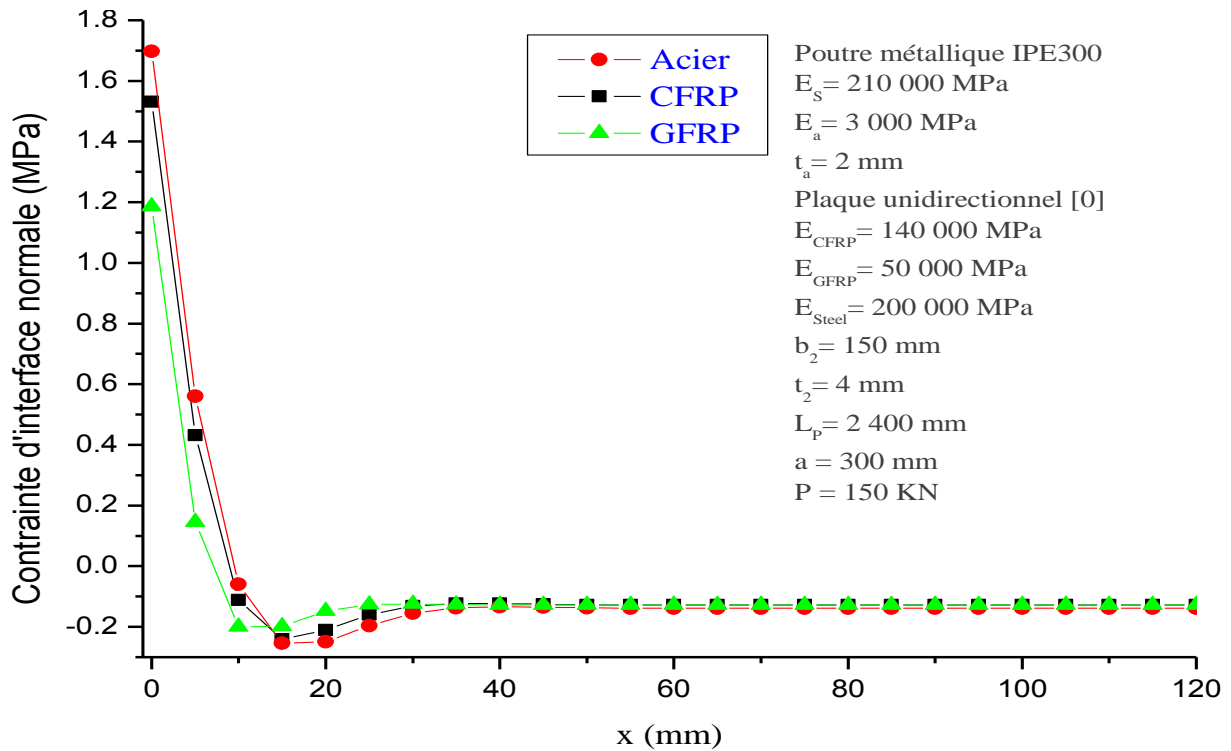


Figure IV. 16 : Comparaison des contraintes d’interface normales des plaques de renforcement CFRP, GRFP et métallique, pour une charge concentrée au milieu

Les figures IV.13 à IV.16 représentent les courbes de variation des contraintes normales et tangentielles le long de l’interface Acier-Plaque suivant la nature de cette dernière. Ainsi, ces figures montrent que, quel que soit la nature du chargement, les contraintes normales et de cisaillement sont plus élevées en cas d’utilisation de plaque métallique et basses dans celui d’utilisation de plaque composite ; et plus précisément, de plaque composite GFRP.

IV.5. Conclusion

Le calcul des contraintes d’interface d’une poutre métallique renforcée par une plaque composite sous un chargement uniformément réparti et sous un chargement concentré au milieu a été présenté par une méthode analytique simple. Il faut noter que l’élément important de la présente analyse est la prise en considération des stratifiés unidirectionnels où nous atteignons le maximum des contraintes d’interface normales et de cisaillement pour une orientation des fibres à 0°.

Les résultats de la présente solution ont été validés par ceux obtenus par la méthode de Tounsi [44]. Une bonne concordance entre les résultats des deux méthodes est observée. Ceci montre que les déformations de flexion et de cisaillement de la plaque de composite n’ont qu’un très léger effet sur les contraintes normales et de cisaillement de l’interface.

L'application de la présente méthode analytique sur les poutres métalliques a été possible après la validation avec la méthode de Tounsi[44] pour les poutres en béton armé ; ce qui est confirmé par :

- la similarité des allures des courbes des contraintes d'interface pour les deux types de poutres (en béton et métallique) avec une légère augmentation des contraintes dans le cas des poutres métalliques ;
- Les contraintes d'interface maximales (pic) sont observées au bord de la plaque puis diminuent brusquement pour les contraintes d'interface normales et progressivement pour celles du cisaillement, pour atteindre toutes les deux, la valeur de zéro à mi-travée ;
- Le renforcement des poutres métalliques peut s'effectuer en collant des plaques métalliques ou des plaques composites. Néanmoins, une comparaison a permis de montrer que l'utilisation des plaques composites est plus efficace ; du fait de la diminution des contraintes d'interface maximales.

Par ailleurs, ce travail étant une continuité des études antérieures par la même méthode ; il est important de rappeler qu'une étude paramétrique a été effectuée et a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les maximums des contraintes d'interface normales et de cisaillement diminuent à mesure que l'épaisseur de l'adhésif augmente ou que le nombre de plis de la plaque de composite diminue ;
- Le fait de prolonger le plus possible la longueur de la plaque de renforcement aux appuis, a pour conséquence un effet positif de réduction des contraintes d'interface aux bords ;
- L'augmentation de la largeur de la plaque composite mène à une réduction des contraintes d'interface maximales.

La validation de la méthode étant effectuée, une étude comparative des contraintes d'interface s'en est suivie d'où découlent les conclusions suivantes :

- Le nombre de couches n'influe pas sur la variation des contraintes d'interface lorsque l'épaisseur globale des couches et leur orientations restent les mêmes ;
- L'augmentation du nombre de couches entraînant une augmentation de l'épaisseur du composite conduit également à une augmentation des contraintes d'interface ;

- Une réduction des contraintes d'interface est constatée au fur et à mesure que l'angle d'orientation des fibres tend vers 90° .

Cette présente méthode a permis de montrer l'effet de la stratification et de l'orientation sur les contraintes d'interfaces. Ainsi l'angle 90° favorise une réduction significative des contraintes d'interface, ce qui remédie au problème de décollement d'une manière théorique mais néanmoins l'angle 0° est préférable d'une manière pratique à cause du moment résistant important qu'il engendre du point de vue économique.

Chapitre V

Analyse numérique des poutres métalliques renforcées par matériaux composites

V.1. Introduction

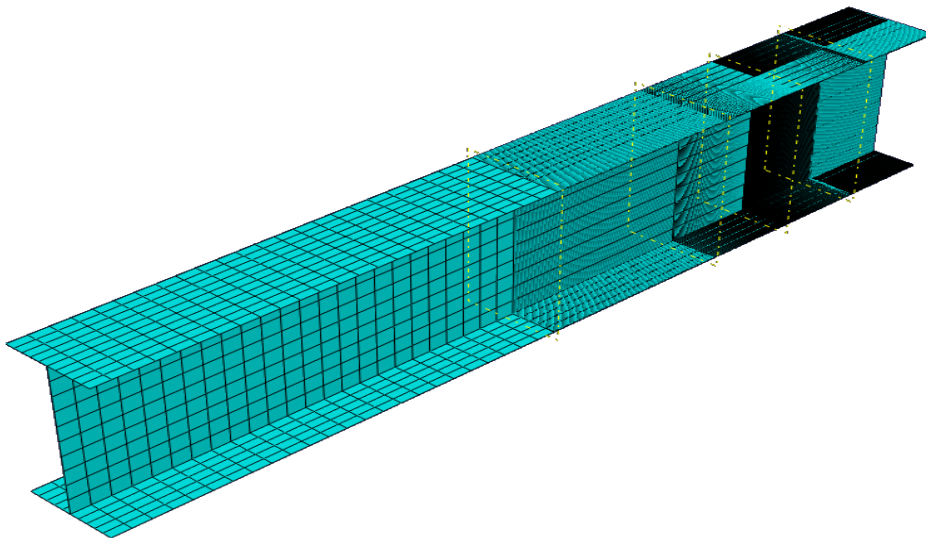
Les contraintes d'interface d'une poutre hybride ont été étudiées par des méthodes expérimentales et théoriques. A cet effet, diverses technologies expérimentales ont été appliquées pour les tester [52,53]. Toutefois, le test expérimental des champs de contraintes d'interface est difficile à cause de la répartition complexe des contraintes locales. Les études analytiques[40,44] ont tendance à développer une solution à forme fermée pour les contraintes d'interface normales et de cisaillement. La détermination de ces contraintes a été considérée dans la dernière décennie pour les poutres en acier et en béton renforcées avec de l'acier de stockage ou des matériaux composites avancés. En particulier, plusieurs solutions analytiques à forme fermée ont été développées [38, 42, 43]. Toutes ces solutions sont pour des matériaux élastiques linéaires et emploient la même hypothèse fondamentale à savoir que l'adhésif est soumis à des contraintes normales et de cisaillement qui sont constantes à travers son épaisseur. C'est cette hypothèse clé qui permet d'obtenir des solutions analytiques à forme fermée relativement simples. Dans les solutions existantes, deux approches différentes ont été utilisées. Roberts [38], a utilisé une approche sans tenir compte de l'effet de cisaillement, alors que dans [37, 40, 42], les conditions de compatibilité de déformation sont directement employées. Récemment Benyoucef et al [43] et Tounsi [44] ont développé des solutions théoriques pour les contraintes d'interface dans les poutres en béton renforcées par une plaque de FRP, basées également sur les conditions de compatibilité de déformation. Benyoucef et al[43] présentent une analyse théorique alternative des contraintes d'interface, où les orientations des fibres de la plaque FRP sont prises en compte, et la rigidité en flexion de la plaque composite est estimée en utilisant la théorie de la stratification. Tounsi[44] a présenté une nouvelle solution théorique, dans laquelle les déformations de cisaillement des adhérents (poutre et plaque de renfort) sont incluses.

Dans la présente recherche, un modèle par éléments finis est développé, utilisant le logiciel commercial Abaqus [54] pour évaluer les contraintes d'interface pour une poutre d'acier en I renforcée avec une plaque en fibre de carbone hygrothermale collée. Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus par des solutions analytiques.

V.2 Analyse en éléments finis

En comparaison avec les tests de laboratoire, qui sont lents et chers, une simulation numérique est moins chère, plus rapide, n'est pas dangereuse et est plus informative. Comme

la puissance de calcul informatique a considérablement augmenté, les méthodes numériques et en particulier la méthode des éléments finis MEF (Finite Elements Method ou FEM), a également été utilisée pour analyser de nombreux problèmes pratiques d'ingénierie. Le processus de modélisation dans le logiciel Abaqus consiste à définir individuellement les différents éléments du modèle, à savoir, la poutre d'acier en I, la plaque en fibre de carbone CFRP et la couche d'adhésif ; définis en tant que « parts » (parties), où chaque élément est compatible avec les autres de manière à rendre possible une analyse complète. La modélisation en elle-même est un processus itératif utilisant ainsi plusieurs analyses afin de pouvoir simuler un ensemble particulier de caractéristiques de manière efficace. Un élément quadrilatère linéaire 4-nœuds de type S4R a été utilisé, avec lequel, seulement la moitié de la poutre est considérée en raison de sa symétrie géométrique et de la symétrie de son chargement. Tous les nœuds à la mi-portée ont été retenus pour assurer la symétrie nécessaire, et les nœuds aux extrémités de la poutre d'acier en I ont été retenus pour représenter les conditions d'appuis simples. Le maillage en éléments finis a été affiné aux extrémités du renforcement afin de capter la concentration des contraintes pertinentes, avec un total de 23 730 éléments et 24 552 nœuds pour la poutre d'acier en I et un total de 4 910 éléments et 5 412 nœuds pour la plaque de FRP et pour l'adhésif. Le nombre d'éléments utilisés dépend en grande partie des paramètres géométriques tels que la longueur et le périmètre de la section transversale. Afin donc, d'obtenir des résultats précis des contraintes d'interface au niveau des extrémités de la plaque, une fine maille a été employée dans ces



domaines, comme le montre la Figure V.1.

Figure V.1: Maillage en éléments finis de la moitié du modèle poutre d'acier en I

Les caractéristiques géométriques et les propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans l'analyse par éléments finis sont les mêmes que celles utilisées dans la présente méthode d'analyse analytique, et sont présentés dans le tableau V.1.

Pour simuler correctement le comportement des interactions entre les différents composants de la poutre hybride, une interaction simulant le contact « Surface To Surface » est utilisée pour décrire ce dernier entre deux surfaces déformables. Les types d'éléments et les propriétés des matériaux ont ensuite été définis et attribués à chaque « part » (partie) correspondante. Une seule charge concentrée a été appliquée à la mi-portée de la poutre d'acier en I renforcée. Alors qu'un matériau isotrope est affecté à la poutre d'acier en I, un type de contrainte-déplacement laminé (Type : Lamina) unidirectionnel est adopté pour la plaque CFRP et un matériau élastique pour la couche d'adhésif. Dans cette étude, les contraintes sont obtenues à partir des valeurs moyennes des contraintes au bas des éléments de la couche d'adhésif.

Tableau V.1: Matériaux et caractéristiques géométriques utilisés dans les analyses analytique et numérique

Eléments	Propriétés géométriques [mm]					
	IPE	b_1	b_0	t_0	t_1	A
150		7.1	10.7	300	300	3 000
Propriétés du matériau						
$E_1=210\ 000\ \text{MPa}$			$\nu_1=0.30$			
CFRP	Propriétés géométriques [mm]					
	$b_2=150$		$t_2=4$		$L_p=2\ 400$	
	Propriétés du matériau					
	E_f	G_f	E_m	G_m	ν_f	ν_m
	230 000 MPa	9 000 MPa	3 435 MPa	1 281.72 MPa	0.203	0.34
Adhésif	Propriétés géométriques [mm]					
	$t_a=4$					
	Propriétés du matériau					
	$E_a=3\ 000\ \text{MPa}$			$\nu_a=0.35$		

V.3. Comparaison avec les résultats expérimentaux

Afin de valider la présente méthode numérique, une section rectangulaire est utilisée. Une des poutres (poutre F31) renforcées avec une plaque d'acier collée testée par Jones[22] a été analysée en utilisant la présente solution. La poutre est simplement appuyée et soumise à quatre points de flexion. Les propriétés du matériau et les caractéristiques géométriques de cette poutre sont résumés au tableau V.2. Les distributions des contraintes d'interface de cisaillement de cette poutre collée à une plaque d'acier en sous-face, soumise à une charge de 60 kN, soit $P = 30$ kN (voir figure V.2), trouvées expérimentalement et calculées par la présente méthode, ont été comparées. Comme on peut le voir dans la même figure V.2, les résultats théoriques prédits sont en accord raisonnable avec les résultats expérimentaux.

Tableau V.2: Caractéristiques géométriques et propriétés du matériau utilisées pour la comparaison avec les résultats expérimentaux

Béton	$b_1 = 155$ mm	$t_1 = 255$ mm	$E_1 = 31$ MPa	
Acier	$b_2 = 125$ mm	$t_1 = 6$ mm	$E_2 = 200\,000$ MPa	
Adhésif	$b_a = 123$ mm	$t_a = 1,5$ mm	$E_a = 280$ MPa	$G_a = 108$ MPa

V.4. Comparaison avec les résultats d'analyse analytique -Discussion

Un des avantages de la simulation par la méthode des éléments finis MEF est que les distributions détaillées des contraintes normales et de cisaillement le long des interfaces peuvent être trouvées. Une poutre d'acier en I simplement appuyée, renforcée avec une plaque hydrothermale collée en fibre de carbone et soumise à la flexion en trois points est représentée sur la figure V.3.

Les paramètres utilisés dans la modélisation en éléments finis sont les suivants :

$$P = 60 \text{ kN}, L = 3\,000 \text{ mm}, L_p = 2\,400 \text{ mm}, t_2 = 4 \text{ mm}, t_a = 4 \text{ mm}, \nu_f = 0.7,$$

$$E_L = 162\,030.50 \text{ MPa}, E_T = 12\,418.25 \text{ MPa}, G_{LT} = 3\,206.78 \text{ MPa}, \text{ et } \nu_{LT} = 0.244.$$

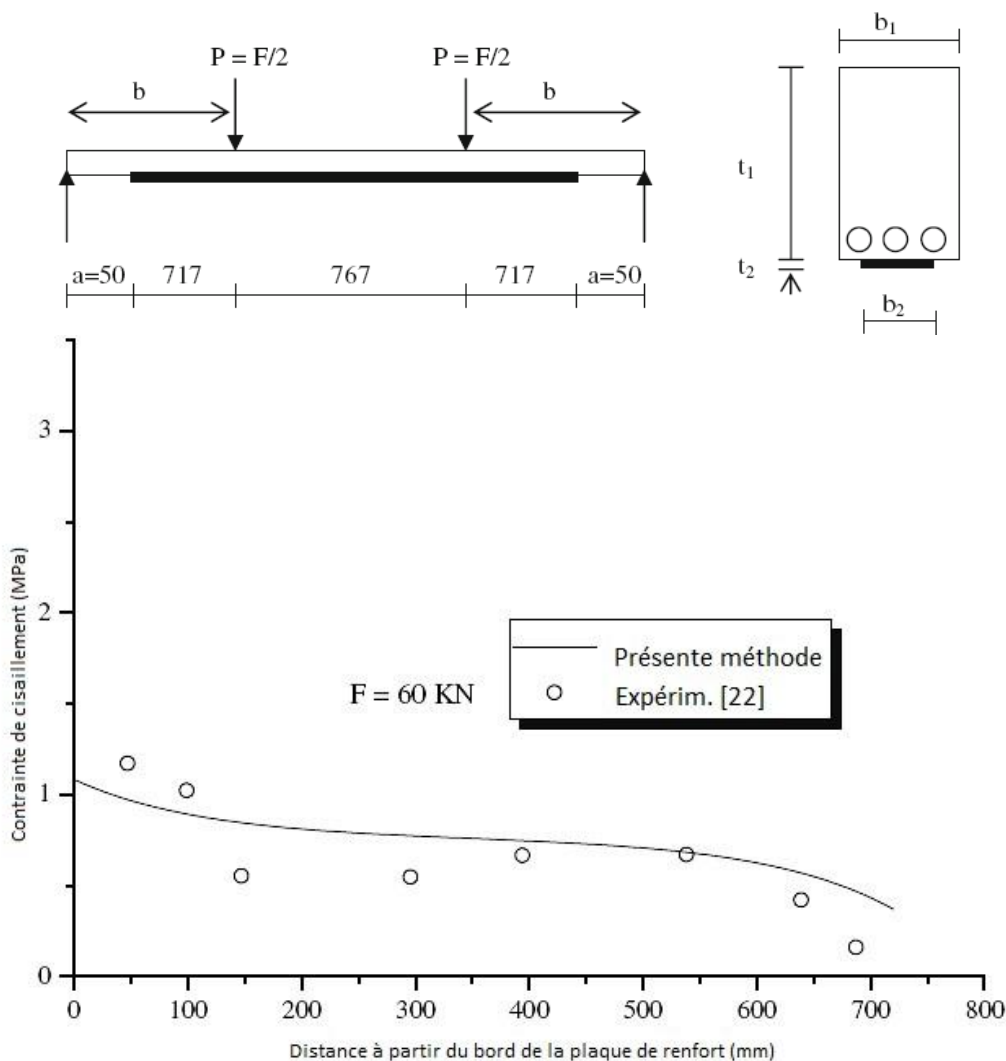


Figure V.2: Comparaison des contraintes de cisaillement dans une poutre en BA renforcée par une plaque métallique avec les résultats de Jones

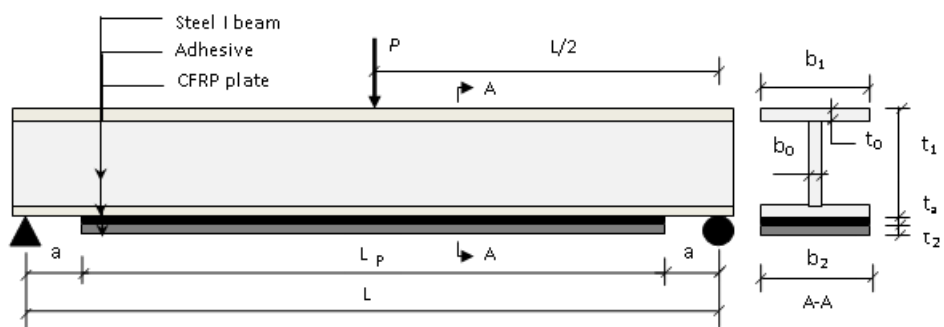


Figure V.3 : Comparaison des contraintes de cisaillement dans une poutre en BA renforcée par une plaque métallique avec les résultats de Jones

Les résultats de la présente méthode d'analyse en éléments finis sont comparés à ceux de la présente méthode d'analyse analytique, et les distributions des contraintes d'interface normales et de cisaillement à proximité de l'extrémité de la plaque en fibre de carbone sont présentées sur la figure V.4.

Comme on le voit sur cette dernière, les résultats MEF sont en accord raisonnable avec ceux de l'analyse analytique. Les contraintes inter faciales normales changent de signe à une courte distance de l'extrémité de la plaque CFRP. Dans la région des contraintes d'interface normales négatives, des déformations de flexion supplémentaires dans la plaque en fibre de carbone dues aux contraintes d'interface de cisaillement sont considérées dans certaines solutions théoriques, par exemple dans les travaux de Tounsi[44].

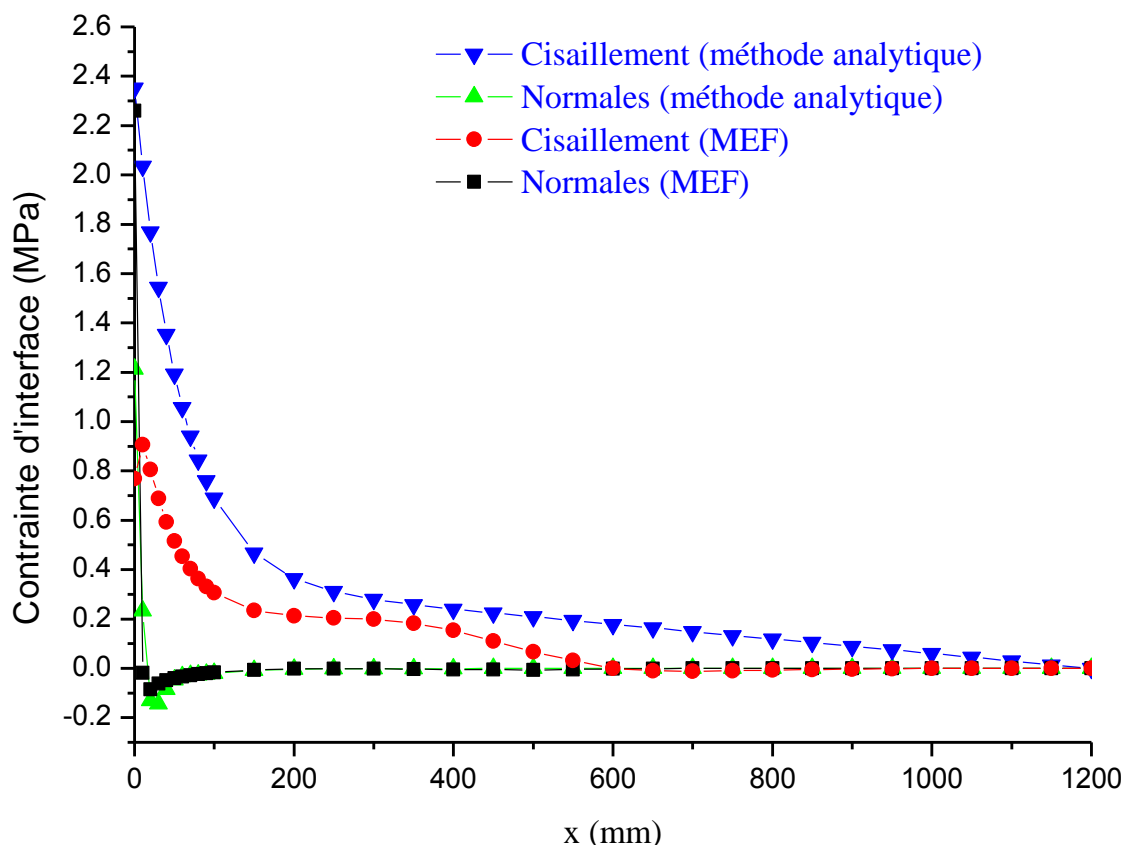


Figure V. 4 : Comparaison des contraintes d'interface, normales et de cisaillement, du modèle en éléments finis d'une poutre d'acier en I renforcée par plaque en fibre de carbone, avec les résultats analytiques

Dans la présente méthode, une étude paramétrique est réalisée pour trois cas pour montrer comment les contraintes maximales sont influencées par l'effet hygrothermique, l'épaisseur de la couche d'adhésif et la fraction volumique des fibres. Tout d'abord, l'effet hygrothermique

sur les contraintes d'interface de l'adhésif a été examiné à cause de considérations technologiques. Par exemple, quand nous utilisons ces plaques pour renforcer les poutres, elles peuvent être déjà exposées aux conditions environnementales. Ainsi, ces plaques ont vieilli avec le temps et leurs propriétés mécaniques sont réduites. D'après les résultats présentés sur la figure V.5, nous pouvons conclure que le vieillissement hygrothermique de la plaque composite collée n'a aucun effet sur les variations des contraintes de l'adhésif, et les résultats MEF sont en accord raisonnable avec ceux de l'analyse analytique.

La figure V.6 quant à elle, montre aussi bien pour l'analyse en MEF que pour l'analyse analytique, les effets de l'épaisseur de la couche d'adhésif ($t_a = 0.1, 1, 2, 3, 4$ et 5 mm) sur les contraintes d'interface. Nous pouvons voir alors que l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésif permet de réduire significativement les contraintes d'interface maximales. Ainsi, l'utilisation d'une couche d'adhésif épaisse, en particulier au voisinage du bord, est recommandée.

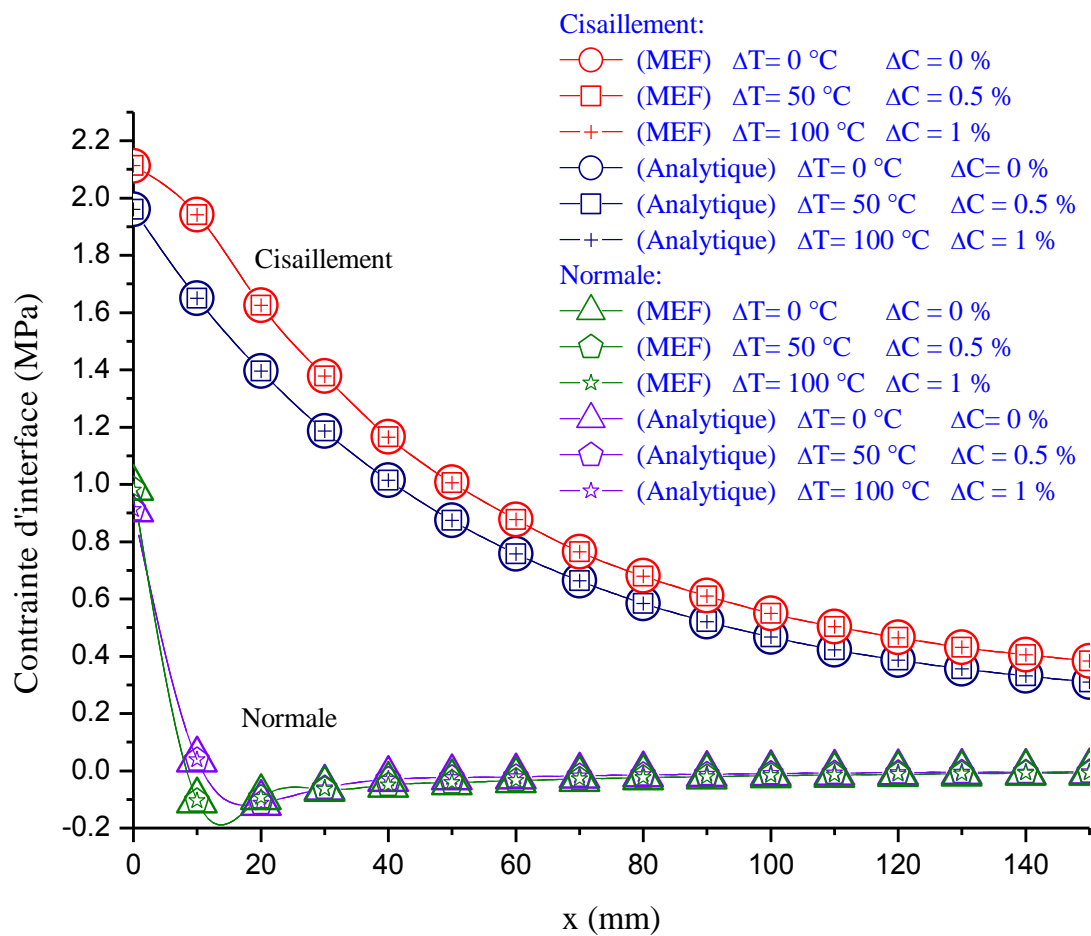


Figure V.5 : Effet hygrothermique sur les variations des contraintes d'interface dans une poutre d'acier en I renforcée par une plaque de fibre de carbone avec $V_f = 0.7$

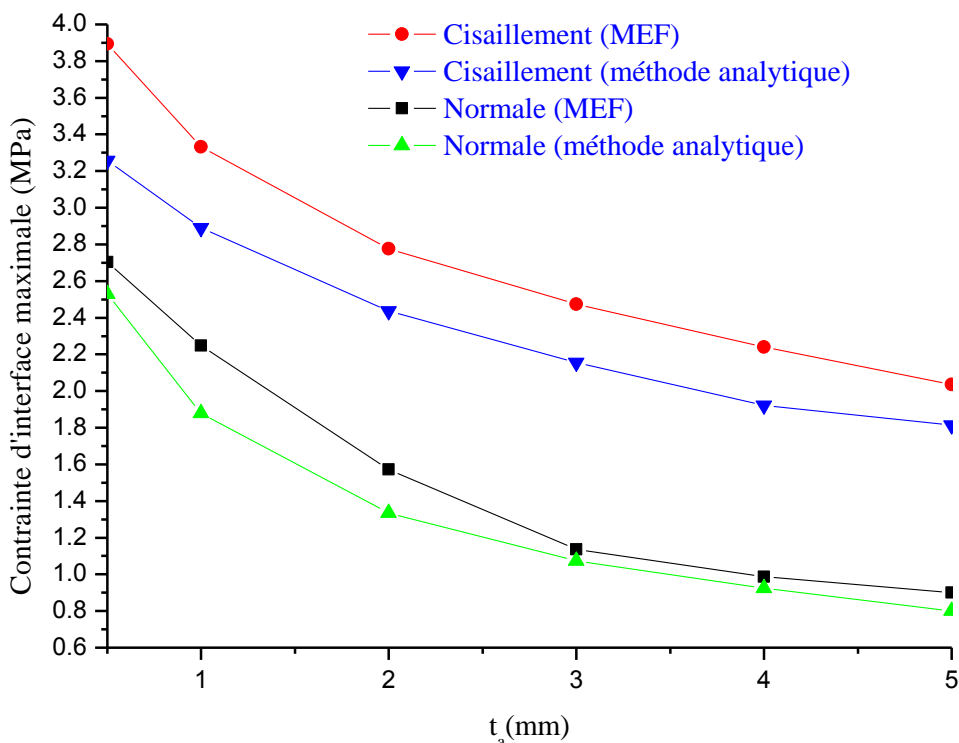


Figure V.6 : Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésif sur les contraintes d'interface dans une poutre d'acier en I renforcée par une plaque de fibre de carbone avec $V_f = 0.7$, $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ et $\Delta C = 0\%$

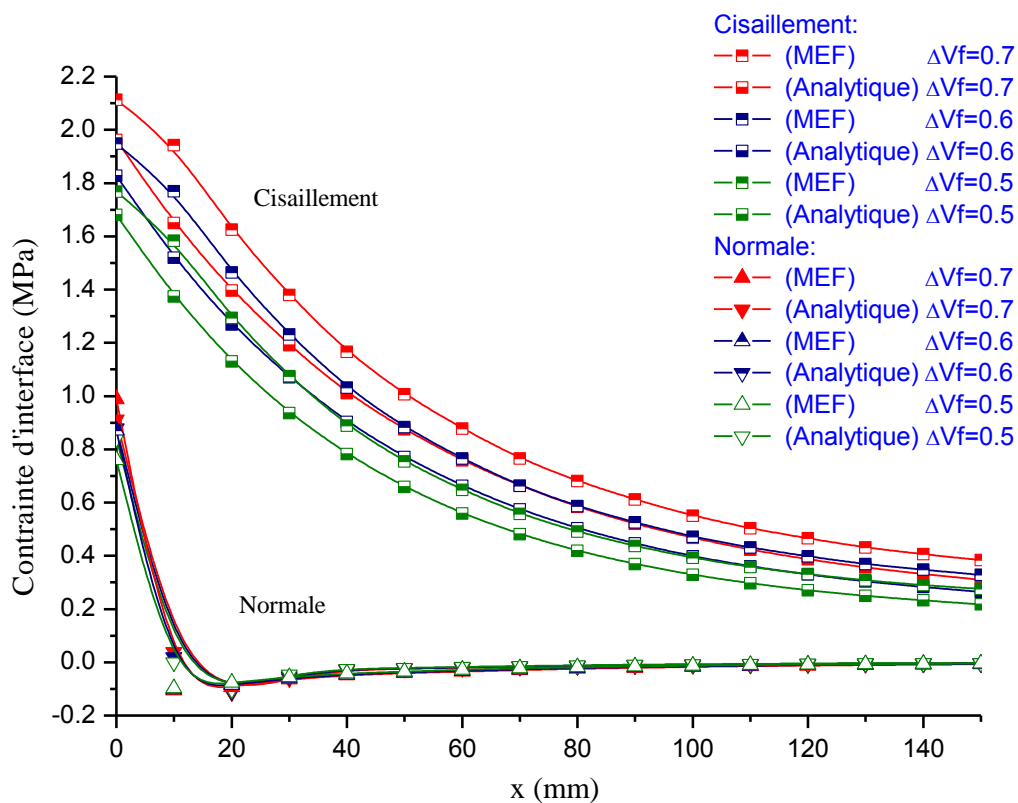


Figure V.7 : Effet de la fraction volumique des fibres sur les variations des contraintes d'interface normales et de cisaillement de l'adhésif dans une poutre d'acier en I renforcée avec une plaque en fibre de carbone CFRP, avec $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ et $\Delta C = 0\%$

La figure V.7 montre l'effet de la fraction volumique des fibres ($V_f=0.5, 0.6$ et 0.7) sur les variations des contraintes d'interface normales et de cisaillement de l'adhésif. On voit que les contraintes d'interface de cisaillement diminuent avec la diminution de la fraction volumique des fibres. Cependant, presque aucun effet sur la variation des contraintes d'interface normales n'est observable.

V.5. Conclusion

Ainsi, il est très clair que la conception d'une réparation appropriée considérant tous les paramètres clés de la poutre d'acier en I, de la plaque en fibre de carbone et de l'adhésif d'interface est très importante. Pour mieux comprendre le comportement des poutres âgées d'acier en I renforcées ou réparées par le collage extérieur de plaques en fibre de carbone hygrothermale, les effets de quelques paramètres ont été étudiés pour aider les ingénieurs à optimiser les paramètres de leurs conceptions et une approche générale systématique et rigoureuse pour l'analyse des efforts d'interface en est présentée. Cette approche est basée sur un modèle élastique, dans lequel les déformations de cisaillement des surfaces adhésives sont incluses par l'hypothèse d'une contrainte de cisaillement constante sur toute la hauteur de la poutre en acier. De la comparaison avec les résultats expérimentaux, nous pouvons déduire que la présente méthode de résolution à forme fermée fournit des prédictions satisfaisantes pour la contrainte de cisaillement d'interface dans les poutres plaques. Les propriétés du matériau de la plaque en fibre de carbone CFRP sont considérées comme étant dépendants de la température et de l'humidité et sont donnés explicitement en termes de propriétés de la fibre, de la matrice et de la fraction volumique des fibres.

Ces résultats démontrent que la présente méthode numérique en éléments finis est simple mais précise, ce qui nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- Aux extrémités des plaques collées, des concentrations élevées de contraintes se produisent, mais la contrainte normale, ou d'épluchage, disparaît à environ 20 mm à partir des extrémités des plaques, ce qui concorde avec les résultats de l'approche analytique ;
- Aucun effet sur la variation des contraintes de l'adhésif n'a été observé lorsqu'une vieille plaque en fibre de carbone hygrothermale est utilisée pour renforcer la poutre d'acier en I ;
- Les contraintes d'interface sont influencées par l'épaisseur de la couche d'adhésif. Une augmentation de l'épaisseur de la couche a conduit à une réduction importante des contraintes d'interface maximales ;

- Les contraintes d'interface de cisaillement ont diminué avec la diminution de la fraction volumique des fibres. Cependant, presque aucun effet n'a été observé sur les variations dans les contraintes d'interface normales.

*Conclusion générale et
perspectives*

Conclusion Générale et Perspectives

Cette partie vise à présenter un état récapitulatif des principaux résultats auxquels a abouti le présent travail.

Le souci majeur dans le renforcement par matériaux composites a toujours été le problème de décollement aux extrémités de la plaque, ce qui mène inévitablement à la ruine de l'ouvrage réhabilité par cette technique. Si les caractéristiques mécaniques des constituants du système (poutre-adhésif-composite) peuvent être déterminées avec une exactitude assez suffisante, il n'en est pas de même pour le comportement de ce système vis-à-vis d'un chargement donné.

Dans un premier lieu, une étude bibliographique dans les chapitres I et II a été exposée afin d'avoir une idée générale sur les raisons de notre choix du type d'étude. Il faut noter que la plupart des matériaux composites utilisés sont présentés sous la forme d'un empilement donnant lieu à un stratifié. D'où une étude des contraintes d'interface en fonction de la stratification et de l'orientation s'avère nécessaire.

Le chapitre III présente ainsi tout d'abord la théorie des plaques stratifiées, ce qui nous a permis d'élaborer les relations existantes entre les composantes de déformation et celles de déplacement, suivi ensuite d'une analyse faisant intervenir la stratification et l'orientation afin de montrer comment elles interviennent dans le calcul des contraintes. Enfin une étude a été réalisée après la validation de l'effet de la stratification et de l'orientation au chapitre IV. Le matériau composite sera appliqué à la face de tension inférieure d'une poutre dans le but de la renforcer, il est impératif d'étudier la zone de contact poutre – composite appelée interface.

C'est dans cette optique qu'au chapitre IV, il a été présentée la présente méthode analytique basée sur une méthode présentée par Tounsi. Après la validation de la présente méthode pour les poutres en béton armé, nous l'avons appliquée sur les poutres métalliques qui font l'objet de notre étude. Enfin une étude comparative des contraintes d'interfaces et de l'efficacité des plaques sous différents chargements (charge uniformément répartie et charge concentrée au milieu) a été élaborée.

La présente méthode a permis de faire une étude paramétrique pour approfondir notre recherche.

En plus du développement d'une méthode analytique, nous avons jugé nécessaire de développer une modélisation numérique avec la méthode des éléments finis. Pour cela,

nous avons utilisé le logiciel commercial « Abaqus version 6.12 ». Cette modélisation est présentée pour valider, une fois encore et si besoin est, la méthode présentée par Tounsi.

Les résultats obtenus nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Dans l'adhésif, les contraintes d'interface maximales, normales et de cisaillement, se produisent au bord de la plaque ; leur concentration augmente si l'effort extérieur augmente et ce, quel que soit le type de charges (concentrée ou uniformément répartie) ;
- Les contraintes d'interfaces maximales diminuent avec l'augmentation de l'alignement de toutes les fibres dans la plaque de composite dans la direction longitudinale de la poutre (orientation 0°) ;
- Lorsque la longueur non-renforcée « a » augmente les contraintes diminuent mais néanmoins il est préférable de prolonger le plus possible le composite aux appuis ;
- L'augmentation de la largeur du composite diminue les contraintes d'interface ;
- L'accroissement de la rigidité de l'adhésif augmente les valeurs de l'effort maximum de cisaillement et de décollement. En conséquence, la longueur efficace d'ancrage diminue quand G_a augmente.
- La rigidité du stratifié, agit contrairement à celle de l'adhésif, en effet les contraintes d'interfaces augmentent pendant que le matériau de la plaque (du CFRP à GFRP) devient plus souple.
- L'épaisseur du stratifié, liée directement au nombre de couches qui le composent, diminue de manière significative les contraintes de cisaillement aux extrémités ;
- L'augmentation de l'épaisseur de la couche adhésive mène à la réduction notable des contraintes d'interfaces maximales.

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

- L'élargissement et la diversification des paramètres afin de jauger les limites de cette présente méthode ;
- L'étude et les prédictions à long terme du comportement des structures renforcées par FRP ;
- Contribution à la mise en place de recommandations relatives à ce type de renforcement ;
- Intensification de l'expérimentation en lien direct avec le sujet.

Références Bibliographiques

- [1] Amara K.H., Tounsi A., Benzair A., “*Transverse Cracking and Elastic Properties Reduction in Hygrothermal Aged Cross – Ply Laminates*”. Materials Sciences & Engineering A, Vol. 396, pp. 369 – 385, 2005.
- [2] Sen R., Libby L., Mullins G., “*Strengthening steel bridge sections using CFRP laminates*”. Composites Part B: Engineering, 39, 309-322,(2001).
- [3] Mertz D.R., Gillespie Jr. J.W., “*Rehabilitation of steel bridge girders through the application of advanced composite materials*”. (Contract NCHRP-93-ID011). Washington, D.C.: Transportation Research Board (1996).
- [4] Tavakkolizadeh M., Saadatmanesh H., “*Strengthening of steel-concrete composite girders using carbon fiber reinforced polymer sheets*”. Journal of Structural Engineering, 129 (1), 30-40 (2003c).
- [5] Al-Saidy A.H., Klaiber F.W., Wipf T.J., “*Repair of steel composite beams with carbon fiber-reinforced polymer plates*”. Journal of Composites for Construction, 8 (2), 163-172(2004).
- [6] Hamelin P., “*Renforcement des ouvrages d’art par matériaux composites*”. Techniques de l’ingénieur, traité plastique et composite, 2002.
- [7] Ferrier E., “*Comportement de l’interface composite-béton sous des sollicitations de fluage thermo stimulé et en fatigue oligo-cyclique. Application au calcul prévisionnel de la durabilité des poutres en BA renforcées*”. Thèse de doctorat, Université Lyon 1, 1999.
- [8] Vénuat M., “*La pratique des ciments mortier et béton*”. Moniteur technique, édition du moniteur, 1989.
- [9] Mohamed I., “*Contribution à l’étude du confinement du béton alcali-réactif par matériaux composites carbone époxy*”. Thèse de doctorat, Université Lyon 1, 2004.
- [10] Gurney T., “*Fatigue of Welded Structures*”, Cambridge University Press, 1979 (second edition).
- [11] University of Tokyo Press, “*Significance of Defects in Welded Structures*”, Ed. Kanazawa, T., A.S., 1974.
- [12] Breumen U., “*Amélioration du comportement à la fatigue d’assemblages soudés : étude et modélisation de l’effet des contraintes résiduelles*”, EPFL, Lausanne, 1989 (Thèse n° 787).
- [13] Calgro J., Lacroix R., “*Maintenance et réparation des ponts*”. Presse de l’école Nationale des Ponts et Chaussées, 11-19, 1997.

[14] **Lianos J.**, “*La maintenance des ponts routiers, Approche économique*”. Presse de l'école Nationale des Ponts et Chaussées, 1997.

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

[16] **Mufti A.A., Erki M.A., Jaeger L.G.**, “*Advanced Composite Materials with Application to Bridges*”, Canadian Society for Civil engineering, 297p (1991).

[17] **Amr Shaat, David Schnerch, Amir Fam, Sami Rizkalla**, “*Retrofit of Steel Structures using Fiber Reinforced Polymers (FRP): State-of-the-Art*”, Nov 2003 Revised Paper.

[18] **CNR - DT 202**, *Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction National Research Council*, “*Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures*”, Rome, June 2007.

[19] **Eurocode 3 - partie 1.1.**, “*Conception et dimensionnement des structures en acier. Règles générales et règles pour les bâtiments*”(ENV 1993-1-1 ; norme française expérimentale P 22-311).

[20] **Tania C.**, “*Etude expérimentale du comportement d'une poutre en béton armé en flexion 3 points réparée par matériaux composites (Approche probabiliste)*”. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Art et Métiers Centre de Bordeaux, 2006.

[21] **Rochdi E. H.**, “*Contribution à l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton armé renforcées par matériaux composites*”. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 2004.

[22] **Jones R., Swamy R. N., Charif A.**, “*Plate separation and anchorage of reinforced concrete beams strengthened by epoxy – bonded steel plates*”. The Structural Engineering 1988,66(5/1): 85 – 94.

[23] **Avril S.**, “*Application des méthodes de mesure de champs à la caractérisation mécanique de poutres en béton armé renforcées par matériaux composites*”. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Mines Saint Etienne, 2002.

[24] **David E.**, “*Comportement mécanique de poutres en béton armé renforcées ou réparées par matériaux composite : Etude expérimentale et modélisation*”. Thèse de doctorat, Université d'Artoise, 1999.

[25] **Meier U.**, “*Strengthening of structures using carbon fiber-epoxy composites*”. Construction and Building Materials, Vol. 9 (6), 341-351, 1995.

[26] **Bruneaux M. A., Benzarti K. L., Chaussadent T., Ehracher A., Foret C.**, “*Durabilité des assemblages collés : modélisation mécanique et physico-chimique*”. Annales du bâtiment et des travaux publics décembre 2005, 10-18.

[27]Chailleux, Bridier, Bail, “Etude des contraintes et déformations dans une éprouvette de cisaillement”. Rapport CTAC n°c1640, Décembre 1981.

[28]Gilbert Y., Rigolot A., “Influence de l'état de surface des subjectiles et de l'épaisseur de l'adhésif sur les propriétés mécaniques des joints collés”. Journées Collage Structural des Matériaux Métalliques. Applications et Développements. Reims 13- 14 Mai 1987.

[29]Bonnard A., “Influence de la rugosité et du revêtement sur l'aptitude au collage des tôles laminées à froid et des tôles galvanisées”. Rapport interne SOLLAC Montataire 1989.

[30]Sika Carbodur, “Cahier des clauses techniques”. Guide de calcul et dimensionnement. SIKA 2000.

[31]Hollaway L.C., Leeming M.B., “Strengthening of reinforced concrete structures – using externally –bonded FRP composites in structural and civil engineering”. Wood head Publishing Limited, Cambridge England, First published 1999, reprinted 2001.

[32]Gay D., “Les propriétés du pli”. Matériaux composites, Chapitre 3, 4ème édition revue et augmentée, Hermès, 1997.

[33]Reyne M., “Technologie des composites”.Hermès, 1990.

[34] Baker A.A., “Repair of cracked or defective metallic aircraft components with advanced fiber composites – an overview of Australian work”. International Journal of Composite Structures, Vol. 2, pp. 153 – 181, 1984.

[35] Megueni A., Tounsi A., Adda Bedia E.A., “Evolution of the stress intensity factor for patched crack with bonded hygrothermal aged composite repair”. Materials & Design, Vol. 28, pp. 287 – 293, 2007.

[36]Megueni A., Tounsi A., Bouiadjra B.B., Serier B., “The Effect Of A Bonded Hygrothermal Aged Composite Patch On The Stress Intensity Factor For Repairing Cracked Metallic Structures”. International Journal of Composite Structures, Vol. 62 (2), pp. 171 – 176, Elsevier, 2003.

[37]Vilnay O., “The analysis of reinforced concrete beams strengthened by epoxy bonded steel plates”. Int. Journal of Cement Composites Lightweight Concrete 10(2): 73 – 78, 1988.

[38]Roberts T.M., “Approximate analysis of shear and normal stress concentrations in adhesive layer of plated RC beams”. The StructureEngineering 67(12): 229 – 233, 1989.

[39]Roberts T.M., Haji – Kazemi H., “A theoretical study of the behavior of reinforced concrete beams strengthened by externally bonded steel plates”. Proc. Institution of Civil Engineers Part 2, 87: 39 – 55, 1989.

- [40] **Stratford T., Cadei J.**, "Elastic analysis of adhesion stresses for the design of a strengthened plate bonded to a beam". *Constr. and Build. Mat.*, 2006, 20, 34 – 35. 134
- [41] **Malek M., Saadatmanesh H., Ehsani M.R.**, "Prediction of failure load of R/C beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end". *ACI Structural Journal* 95(2), 142 – 152, 1998.
- [42] **Smith S.T., Teng J.G.**, "Interfacial stresses in plated RC beams". *Engineering Structures* 23(7), 857 – 871, 2001.
- [43] **Benyoucef S., Tounsi A., Meftah S. A., Adda Bedia E. A.**, "Approximate analysis of the interfacial stress concentrations in FRP – RC hybrid beams". *Composite Interfaces* 13(7), 561 – 571, 2006.
- [44] **Tounsi A.**, "Improved theoretical solution for interfacial stresses in concrete beams strengthened with FRP plate". *International Journal of Solids and Structures* 43, 4154 – 4174, 2006.
- [45] **Smith S.T., Teng J.G.**, "FRP – strengthened RC beams. I: Review of debonding strength models". *Engineering Structures*, 2002, 24(4), 385 – 395.
- [46] **Smith S.T., Teng J.G.**, "FRP – strengthened RC beams. II: Assessment of debonding strength models". *Engineering Structures* 2002, 24(4), 397 – 417.
- [47] **Tounsi A., Amara K.**, "Stiffness degradation in hygrothermal aged cross-ply laminate with transvers cracks". *AIAA Journal*, 43(8), 1836 – 1843, 2005.
- [48] **Tounsi A., Benyoucef S.**, "Interfacial stresses in externally FRP – plated concrete beams" *Inter J Adhesion & Adhesives* 2007; 27:207 –15.
- [49] **Dhatt G.**, "Numerical analysis of thin shells by curved triangular elements based on discrete Kirchoff hypothesis". *Proc. ASCE Symp. On Application of FEM in civil engineering*, Vanderbilt Univ., Nashville, Tenn., P. 255-278 (1969).
- [50] **Banks H.T., Smith R.C., Wang Y.**, "Smart Material Structures Modeling, Estimation and Control". John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England, 1996.
- [51] **Weiss J., Bord C.**, "Les matériaux composites" : titre II. Editions de L'USINE, p. D.75-78.
- [52] **Berthelot J.M.**, "Matériaux Composites – Comportement mécanique et analyse des structures". Deuxième édition, Masson 1996.

[53] Etman E. E., Beeby A. W., “*Experimental program and analytical study of bond stress distributions on a composite plate bonded to a reinforced RC beam*”. *Cement and Concrete Composites* 2000, 22(4): 281 – 291.

[54] Abaqus guide Version 6.7 (2007), “*Computer Software for Interactive Finite Element Analysis*”. By Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. Pawtucket, RI.